

Российская академия наук
Институт прикладной астрономии

На правах рукописи

Гусев Александр Васильевич

**ЗАХВАТ В РЕЗОНАНСНОЕ ВРАЩЕНИЕ И ФИЗИЧЕСКАЯ ЛИБРАЦИЯ
МНОГОСЛОЙНЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ**

Специальность 01.03.01 – Астрометрия и небесная механика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург
2008

Работа выполнена в Казанском государственном университете им В.И.Ульянова - Ленина.

Официальные оппоненты

доктор физико-математических наук, профессор

Бабаджанянц Левон Константинович

доктор физико-математических наук, профессор, чл.-корр. РАН

Белецкий Владимир Васильевич

доктор физико-математических наук, профессор

Красинский Георгий Альбертович

Ведущая организация

Главная Астрономическая Обсерватория РАН (Пулково, С - Петербург)

Защита состоится 4 июня 2008 г. в 10 час. на заседании диссертационного совета Д.002.067.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук при Институте Прикладной Астрономии РАН, 191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПА РАН.

Автореферат разослан

2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук



Медведев Ю.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Экспоненциальный рост наблюдательной и теоретической информации по планетам и лунам Солнечной системы, планетным системам вне-солнечного типа, пульсарам предъявляет особые требования к широте и глубине научного анализа на базе фундаментальных представлений о небесной механике, образовании и эволюции Солнечной системы, физике протопланетного вещества, сложного внутреннего многослойного строения небесных тел.

Интерес к вращательной эволюции небесных тел всегда занимал важное место в задачах астрометрии и небесной механики. Но именно в последние годы, в связи с получением информации высокой точности и надежности о спин-орбитальных характеристиках планет и лун Солнечной системы, экзопланетных систем, появился мощный поток научно-теоретических публикаций по внутреннему строению этих небесных тел. Причина этого всплеска кроется в возможности изучать внутреннее строение небесных тел через особенности их вращения.

В настоящее время Луна является объектом глубокого исследования по многим космическим экспериментам: миссии NASA Клементина (1994) и Лунар Проспектор (1998–1999), лазерная локация Луны (ЛЛЛ) (1969–2006), европейский спутник СМАРТ-1 (2003–2006). В программу исследований включается изучение тонких эффектов вращательного движения - физической либрации, исследование гравитационного поля Луны и планет методами межспутникового слежения, создание селенографической системы координат, моделирование внутреннего строения Луны. Исследования последних десятилетий однозначно поставили перед учеными проблему существования и происхождения лунного ядра: есть ли оно, какова его структура, химический состав и агрегатное состояние. Эти вопросы непосредственно связаны с глобальной проблемой происхождения и эволюции системы Земля-Луна.

Реализация современных долгосрочных **программ исследования Луны** в рамках проектов ЛЛЛ, SELENE, ILOM (JAXA, Japan), LRO (NASA), Chang'e (China), Chandrayaan (India), Луна Глоб (РКА, Россия) направлена как на создание долговременных лунных баз, так и на получение широкого спектра информации о лунном гравитационном поле, о точном положении Луны в инерциальной системе координат, динамической и геометрической фигуре Луны и ее внутреннем строении.

Изучение **свободной и вынужденной либрации** в теории физической либрации вязко-упругой Луны также является одним из важных этапов в изучении динамики и внутреннего строения нашего естественного спутника.

Данные лазерной локации Луны с Земли показывают наличие свободной либрации и жидкого ядра Луны. Но механизм поддержания долговременной свободной либрации недостаточно ясен. Кроме того, данные ЛЛЛ привели к открытию диссипации вращательного движения Луны. Природа аномальной диссипации не определяется однозначно. Хотя учет приливной диссипации уменьшает расхождение теории с наблюдениями, этого эффекта недостаточно, чтобы объяснить полностью обнаруженную диссипацию.

Методы структурного анализа внутреннего строения, разработанные для Земли, могут быть успешно использованы и для Луны, но необходимость принимать во внимание резонансный характер ее орбитально-вращательного движения существенно усложняет математическое описание этих процессов. Важно построить аналитическую теорию для спин-орбитального движения Луны высокой точности. Эта теория должна быть пригодна для уточнений параметров гравитационного поля, резо-

нансных либраций, чисел Лява, добротности Q , вязкости мантии и ядра. Необходимо принимать во внимание спин-орбитальные взаимодействия, резонансное взаимодействие с Венерой, а также построение трехслойной модели вязкой Луны с приливной и турбулентной диссипацией на границе мантия-ядро. Особое значение приобретает исследование свободной либрации Луны. Определение периодов и амплитуд свободных либраций позволит сделать вывод о наличии жидкого ядра Луны, оценить его размеры, форму, геофизический состав, тепловой профиль. Большое значение будут иметь либрационные наблюдения в ИЛОМ-проекте миссии SELENE-B (2013г).

В настоящее время **открытие более 260 планетных систем** вокруг звезд главной последовательности и пульсаров породило огромный интерес к фундаментальным вопросам космогонии, образованию и ранней эволюции планет земного типа, устойчивости планетных систем в экстремальных условиях и на космологических шкалах времени, фундаментального влияния гравитационных, магнитных полей и приливных эффектов на образование резонансных структур во Вселенной.

Открытие планет вне Солнечной системы (экзопланет) обозначило начало новой эпохи развития и применения методов небесной механики. С момента обнаружения в 1992 г. первой экзопланеты к настоящему времени открыто 260 экзопланет в 232 планетных системах около звезд главной последовательности и 5 планет в 2 планетных системах около пульсаров. Согласно каталогу планет внесолнечного типа 39 % больших полуосей орбит экзопланет не превышают 0.5 а.е., среди которых 26 планет имеют $a \sim 0.1$ а.е. Для планет с массами меньше массы Юпитера большие полуоси орбит лежат в узком интервале от 0.02 а.е. (OGLE-TR-56) до 0.5 а.е. Среди открытых экзопланет 66 обращается по эллиптическим орбитам с $e \geq 0.3$ и 22 имеют $e \sim 0.1$. Все планеты, обращающиеся около звезд главной последовательности, имеют массу порядка массы Юпитера, которые обращаются на расстояниях от 0.05 до 2 а.е. с периодами обращения от 25 до 1000 дней. Периоды обращения планет внесолнечного типа около звезд главной последовательности можно условно разделить на три группы: 1) короткопериодичные (< 30 дней) – 26 экзопланет, среди которых 20 имеют период обращения менее двух недель; 2) среднeperиодичные (от 0.5 месяца до 3 лет) – 61 планета и 3) долгопериодичные (свыше 3 лет) – 30 планет. Открытые короткопериодичные экзопланеты дают возможность проследить эволюцию орбиты, а в будущем - и параметров вращения.

В настоящее время известны 26 мультипланетных систем, в которые входят 37 экзопланет. В 17 мультипланетных планетарных системах планеты обращаются в орбитальном резонансе, причем наблюдаются как резонансы порядков 2:1 (Gliese 876, HD 82943, HD 160691), 3:1 (55 Cnc), 3:2 (PSR B1257+12), так и высоких порядков 5:1 (ϵ And), 7:3 (47 Uma), 10:1 (HD 37124), 11:2 (HD 12661).

Обнаруженные планеты внесолнечного типа обладают очень разнообразными динамическими характеристиками, что ставит задачу детального изучения вопросов эволюции их вращения для широкого спектра параметров планетной системы с учетом возмущений со стороны гравитационных, магнитных и приливных моментов. Особый интерес представляет класс экзопланет – «горячие Юпитеры», которые обращаются вокруг родительской звезды на очень близких расстояниях от звезды (0.02 – 0.5 а.е.). Имея массу порядка массы Юпитера, верхние слои атмосферы планеты разогреваются до 2000°C . На вращение «горячих Юпитеры» существенным образом оказывают влияние приливные моменты, что делает экзопланеты особенно интересными объектами исследований.

Цели и задачи работы

Настоящая работа имеет своей целью исследование особенностей вращения многослойных тел:

1. Изучение тонких эффектов физической либрации во вращении Луны, связанных с наличием у нее многослойного ядра.
2. Анализ свободных либраций и нутаций для многослойной Луны, моделирование внутреннего строения Луны и внутренних планет Солнечной системы.
3. Исследование сценариев гравитационного и приливного захвата небесных тел в резонансное вращение методами качественного анализа, теории бифуркации и структурной устойчивости динамических систем.
4. Исследование вращательной эволюции экзопланет под действием гравитационных и магнитных возмущений для широкого спектра параметров.
5. Изучение поведения вектора кинетического момента экзопланеты под действием приливных возмущений со стороны звезды методами качественного анализа.

Основные методы исследований

Мы представляем анализ системы дифференциальных уравнений гравитационного захвата в резонансное вращение динамически-симметричного тела под действием гравитационных и приливных моментов для случая плоского движения. Используются методы качественного, бифуркационного и структурного анализа динамических систем

Методом Гамильтоновой динамики получены значения периодов свободных либраций многослойных небесных тел. Исследование периодов свободных либраций Луны и многослойных планет проводилось методом компьютерного моделирования. Исследования внесолнечных планетных систем проводились методами качественного анализа и теории бифуркаций динамических систем на плоскости, сфере и цилиндре, описывающих вращательную эволюцию экзопланетных систем.

Научная новизна работы

1. В рамках Гамильтонова подхода к описанию дифференциального вращения многослойных небесных тел развита теория и впервые сделаны оценки периодов возможных свободных либраций и свободной нутации внешнего жидкого и твердого внутреннего ядра Луны. Впервые рассчитан спектр свободных либраций и выполнено моделирование с целью определения зависимости полученных периодов свободного вращения от радиуса, плотности, химического состава ядра.
2. Методами теории качественного исследования и теории бифуркаций впервые проведен полный качественный анализ уравнений захвата небесных тел в резонансное вращение под действием гравитационного и приливного моментов. Методами теории бифуркаций построено разбиение пространства параметров исследуемых задач на топологические неэквивалентные области эволюции планетных систем.
3. Впервые построены галереи из 15 (под действием только приливного момента) и 79 (под действием гравитационного и приливного моментов) фазовых портретов всех этапов захвата небесного тела в резонансное движение, имеющие важное космогоническое значение. Выявлены условия, при которых может происходить захват в резонансное вращение.
4. Впервые исследованы эволюционные уравнения, описывающих вращение динамически-симметричного небесного тела под действием гравитационных и магнитных моментов с учетом эволюции орбиты для всех возможных значений динамических

параметров экзопланетных систем. Впервые получена галерея фазовых портретов на плоскости, сфере и цилиндре для всех значений параметров эволюционной системы уравнений под действием основных возмущающих моментов; построены бифуркационные кривые и поверхности, описывающие топологическую перестройку фазового пространства и разбиение пространства параметров.

5. Проведен анализ системы эволюционных уравнений для динамически-симметричной экзопланеты под действием приливных моментов. Впервые проведен полный анализ уравнений захвата в резонансное вращение под действием только приливного момента: впервые выявлены бифуркационные плоскости, описаны 19 фазовых картин, показана возможность захвата в резонанс планет и спутников как с прямым вращением (Луна, Меркурий), так и с обратным (Венера). Построены бифуркационные кривые и поверхности, описывающие топологическую перестройку фазового пространства, и разбиение пространства параметров эволюционных уравнений.

Научная и практическая значимость.

В работе представлен комплекс исследований вращательной эволюции Луны, планет земного типа, экзопланетных систем на основе аналитического, качественного и бифуркационного подходов. Проведенный анализ галереи фазовых портретов дает широкий спектр частот свободной либрации Луны, эволюционных треков вращения внесолнечных планет, расширяющий космогонические сценарии образования и эволюции планетных систем. Анализ бифуркационных кривых динамических систем конкретизирует критические значения динамических параметров экзопланетных систем.

Галерея более чем из 120 фазовых портретов гравитационного захвата и выхода из резонанса подтверждает и расширяет известные сценарии образования резонансных зон и их перестройки. Среди исследуемых бифуркаций мы встречаем типичные катастрофы Арнольда-Тома, которые иллюстрируют структурную устойчивость явления гравитационного захвата в резонансное вращение. Полученные результаты могут играть роль начальных данных для оценки вероятности гравитационного захвата конкретных небесных тел.

Проведен качественный анализ уравнений захвата небесных тел в резонансное вращение под действием гравитационного и приливного моментов. Выявлены все бифуркационные поверхности, плоскости и кривые. Проанализированы полученные результаты, выявлены условия, при которых может происходить захват в резонансное вращение конкретных планет и лун. Данная методика позволяет при задании начальных данных оценивать вероятность захвата тела в резонанс реальных небесных тел.

Рассчитанный спектр периодов свободных либраций и свободной нутации внешнего жидкого и твердого внутреннего ядра многослойной Луны цитируется ведущими специалистами JPL, NASA и используется при обработке данных лазерной локации Луны.

Предложен проект оценок и рекомендаций по наблюдению физической либрации многослойной Луны для японской робототехнической программы ILOM на южном полюсе Луны на 2008-2013 гг.

Основные результаты подтверждены: тщательностью аналитических расчетов, аналитическим переходом от хорошо известных простых случаев к исследуемым сложным случаям в динамических системах; сравнением и совпадением в области пересечений результатов вычислений с известными исследованиями других авторов.

Результаты диссертации также могут быть использованы в следующих астрономических учреждениях: ГАИШ МГУ, ИНАСАН, ИКИ, ИПА (Санкт-Петербург), Пулковская обсерватория, ФИАН.

Основные положения, выносимые на защиту Развитие гамильтонового подхода для описания дифференциального вращения многослойных небесных тел. Компьютерное моделирование периодов свободных либраций для различных моделей многослойной Луны и многослойных планет земного типа при различных значениях фундаментальных характеристик и внутреннего строения планет и лун.

1. Качественный анализ уравнений захвата небесных тел в резонансное вращение под действием гравитационного и приливного моментов. Построение и разбиение пространства исследуемых задач на топологические неэквивалентные области эволюции планетных систем методами теории бифуркаций. Структура бифуркационных поверхностей, плоскостей и кривых в пространстве параметров.

2. Построение галереи из 15 (под действием только приливного момента) и 79 (под действием гравитационного и приливного моментов) фазовых портретов всех этапов захвата небесного тела в резонансное движение, имеющие важное космогоническое значение. Последовательный анализ фазовых портретов одно-, двух-, трех-, четырех-параметрических динамических систем (ДС) и бифуркационный анализ пространства параметров гравитационного захвата в резонансное вращение и переходных режимов из одного типа резонанса в другой.

3. Качественный и бифуркационный анализ дифференциальных уравнений захвата в резонансное вращение Луны и многослойных планет под действием приливного момента. Выделение бифуркационных плоскостей и построение галереи из 19 фазовых портретов. Галерея из 64 фазовых портретов на плоскости, двумерной сфере и цилиндре для всех значений параметров эволюционной системы уравнений вращения экзопланетных систем под действием основных возмущающих моментов.

4. Структурный анализ галереи фазовых портретов на плоскости, сфере и цилиндре для всех значений параметров эволюционной системы уравнений под действием основных возмущающих моментов. Построение бифуркационных кривых и поверхностей, описывающих топологическую перестройку фазового пространства, и разбиение пространства параметров эволюционных уравнений вращения экзопланетных систем.

Апробация работы

Результаты, полученные в диссертации, неоднократно докладывались на научных семинарах и итоговых конференциях КГУ (1987 – 2008гг.), Координационном Совете по небесной механике ГАИШ, МГУ, общеинститутском семинаре ИКИ РАН, а также было сделано более 130 устных и стендовых докладов на 54 Всероссийских и Международных конгрессах и конференциях:

- [1] 22, 24, 25, 26 Генеральные ассамблеи МАС (IAU): 1994, Гаага; 2000, Манчестер; 2003, Сидней; 2006, Прага.
- [2] 30, 32, 33, 34, 35 Генеральные ассамблеи Коспар (COSPAR): 1994, Гамбург; 1998, Нагоя; 2000, Варшава; 2002, Хьюстон; 2004, Париж; 2006, Пекин.
- [3] Всероссийские астрономические конференции: “БАК-2001”, Санкт-Петербург; “БАК-2004”, Москва; “БАК- 2007”, Казань.
- [4] 14th Int. Congress of Mathematicians, 1994, Zurich; 11th – 12th Int. Assembly on Mathematical Physics “IAMP-11”:1994, Paris; “ICMP-12”, 2000, London; Int. Congress on Theoretical

- Physics «ГН 2002», 2002, Paris; Int. conf. «New Geometry of Nature, 25 Aug.-5 Sept, 2003, Kazan
- [5] Int. conf. "Dynamical systems and chaos", 1994, Tokyo University; Меж. конф. "Modern the theory of dynamical systems and application. to theoretical Cel. Mech.", 2002, МИАН, Москва
- [6] Меж. Математит. Конгресс "Нелинейная динамика-2007", Июнь 4–8, 2007, С-Петербург
- [7] All-Russian Conference with international. participation "Problems of Celestial Mechanics" Inst. of Theoretical Astronomy. RAS, St.-Petersburg, 1997; Scientific Conference "New Theoretical Results and Practical Problem of Celestial. Mechanics", Dec. 2-4, 1997, MSU, Moscow.
- [8] IAU Symposium 172, "Dynamics, ephemerides and astrometry in solar system", 1995, Paris; IAU Colloquium 165, "Dynamics and astrometry of Natural Celestial Bodies", 1996, Poznan.
- [9] The 6th Всероссийская конференция "Новые результаты аналитической и качественной небесной механике", 2000, ГАИШ, Москва; US-European Celestial Mechanics Workshop, 3-7 July, 2000, Poznan, Poland; Меж. конференция «Небесная механика-2002: результаты и перспективы», 2002, Институт Прикладной Астрономии, Санкт-Петербург.
- [10] Conference of the NATO ASI "Lives of the neutron stars", 29 Aug.-11 Sept., 1993, Kemer, Turkey; C. Lanczos Inter. Center. Conference, 12-17 Dec., 1993, Raleigh, NC, USA; 1st Int. Conference on Cosmoparticle Physics " COSMION - 94 ", 1994, Moscow; Int. Conf. "GR-12", June, 19-24, 2005, Kazan, Russia, Int. conf. on Gravitation and Cosmology, 2006, Moscow.
- [11] Меж. конференция «Scientific Frontiers in Research on Extrasolar Planets», 2002, Вашингтон; Коллоквиум МАС № 189 «Astrophysical Tides: Effects in the Solar and Exoplanetary Systems», 2002, Нанкин; 1st European Planets Scientific Conf., 18-22 Sept., 2006, Berlin.
- [12] XXIX General Assembly of the International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI), 1997, Thessaloniki; Symposium of SEDI'98, Vinci-Tours, 1998, France; The Russian Conf. "The Earth's core 2000", 2000, Moscow, Russia; 7th Symposium Study f Earth's Interior, 2000, Exeter, UK; IAGA-IASPEI Scientific Assembly, 2001, Hanoi; 23th–24th Gen. Assembly of Int. Union Geodesy and Geophysics: 2003, Sapporo; 2007, Perugia
- [13] Меж. Конф. "Геометризация физики III, IV", 1997, 1999г, КГУ, Казань; Меж. конф. «100 летАОЭ», 2001, КГУ, Казань; Int. Conf. "Near-Earth Astronomy", Sept. 19-24, 2005, Kazan.
- [14] Меж. конференция "JENAM 2000", МГУ, Москва, "JENAM 2002", Порту, Португалия; Меж. конференция EAAS "Международное сотрудничество в области астрономии", 2002, ГАИШ, Москва; 8th General Assembly of EAAS, June 1-6, 2005, MSU, Moscow.
- [15] Int. Scientific Conf. "ILOM", Nov. 19-20, 2004. Kagoshima Univ.; 2nd Int. Annual Sci.. Conf. "RISE", Feb, 17-18, 2005, NAOJ, Mitaka; 8th Int. Lunar Expl. WG, 17-23 July, 2006, Beijing.
- [16] 36th – 38th Lunar and Planets Scientific Conference, Houston, USA: 2005, 2006, 2007 гг.
- [17] 5th Генеральная ассамблея Меж. Аэрокосмического союза (IAC), 27-31 Авг. 2006, Москва.

Различные этапы работы прошли предварительную экспертизу и были поддержаны многочисленными международными грантами (NASA, JSPS, IAU, COSPAR, IUGG, IASPEI, IAMP) для участия в научных конференциях и стажировках и российскими грантами: грант Президента РФ (2005 – 2006 гг.) в качестве научного руководителя кандидатской диссертации (И.Н.Китиашвили), международный грант РФФИ - JSPS (Россия – Япония, 2007-2009 г)

Публикации и личный вклад автора.

Основные результаты, представленные в диссертации, получены автором самостоятельно. Основные результаты диссертации опубликованы в 49 работах общим листажом в 821 стр. , 46 работы написаны совместно с соавторами. Материал всех 49 работ изложен в трех монографиях, 28 публикациях ведущих отечественных и зарубежных изданиях, 18 статей - в Трудах международных и всероссийских конференций. Среди всех публикаций автора 21 работа, содержащие основные научные результаты диссертации, опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссии и, согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 20 апреля 2006 г. N 227, приравненным к

ним: депонированным в организациях государственной системы научно-технической информации рукописи работ и опубликованными в материалах всесоюзных, всероссийских и международных конференций и симпозиумов.

Сделано более 130 докладов на Всесоюзных, Российских и Международных конференциях, симпозиумах и конгрессах. Проводимые исследования охватывают широкий круг вопросов небесной механики, динамических систем в астрономии. В совместных публикациях диссертанту принадлежит постановка задач, формулировка и решение основных уравнений вращения, интерпретация решений. В большей части совместных с коллегами работ роль диссертанта является ведущей (где он первый автор); в остальных работах участие соавторов в проведении исследований и анализе результатов – равное.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Работа изложена на 354 страницах, включает 130 рисунков (71 в приложениях А, В, С, D), 25 таблиц (14 в приложении В, 6 в Приложении С, 3 в Приложении D). Список литературы состоит из 326 библиографических ссылок.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы ее основные цели и задачи, перечислены результаты работы, выносимые на защиту, указана их новизна, значимость и перспективы их использования, приведена структура и содержание диссертации.

В **первой главе** дается обзор теоретических достижений при исследовании спин – орбитальной эволюции планетных систем. В параграфе 1.1 описываются основные этапы исследований вращательной эволюции небесных тел от работ Л. Эйлера, Дж.Л. Лагранжа, П.С. Лапласа до современности. Дан краткий обзор опубликованных работ по теории вращения, захвата в резонансное вращение и устойчивости вращения небесных тел. Выведены базисные уравнения, описывающие нерезонансное вращение небесных тел. В параграфе 1.2 дано описание вращения, внутреннего строения и эволюции Луны. Описаны законы Кассини для твердотельной модели Луны. На основе последних данных ЛЛЛ и миссий Клементина (1994г) И Лунар Проспектор (1998-99гг) представлен геофизический разрез полной Луны и ее центральной части – жидкого расплавленного ядра. В параграфе 1.3 рассмотрены приливные явления в Солнечной системе и в планетных системах около других звезд. Показана важность приливного возмущения при захвате небесного тела в резонансное вращение вокруг центрального тела как на ранних этапах, так и на космогонических временах, эволюции планетных систем с естественными спутниками. Параграф 1.4 включает обзор современных данных об открытых планетах внесолнечного типа (экзопланет) около звезд главной последовательности и пульсаров, приводятся статистические распределения по основным характеристикам планетных систем. Описываются основные эволюционные теории, объясняющие наблюдаемые характеристики экзопланетных систем. Дается краткий обзор методов открытия и исследования экзопланет. Приводятся данные о действующих и готовящихся к старту космических и наземных миссиях и проектах. В параграфе 1.5 представлен краткий обзор внутреннего строения нейтронных звезд и результаты исследования вариации вращения многослойных нейтронных звезд в качестве примера эффективного использования гамильтонового подхода к вращению многослойных небесных тел. В этом параграфе описываются две модели вращения пульсара и представлены основные уравнения для двухслойной прецессирующей нейтронной звезды, приводятся оценки динамического сжатия пульсаров. В конце параграфа приводится краткая методика моделирования вращения

нейтронных звезд с целью получения оценок их динамического сжатия, периодов Чандлеровских колебаний и свободной нутации ядра пульсаров для различных уравнений состояния сверхплотного вещества и массы нейтронной звезды. В параграфе 1.6 излагаются основные положения качественного анализа динамических систем (ДС), теории бифуркаций и структурной устойчивости, приведены методы исследования ДС в небесной механике, которые используются в диссертации

Во **второй главе** всесторонне рассмотрена вынужденная и свободная физическая либрация многослойной Луны.

В параграфе 2.1 представлены обобщенные законы Кассини для двухслойной модели Луны (Рис.1), указаны основные разновидности либрации многослойной Луны, рассмотрена физическая либрация однородной Луны, оценено влияние диссипации энергии на границе ядро-мантия на вращение Луны.

В параграфе 2.2 рассмотрена свободная либрация многослойной вязко - упругой Луны. Сформулирован Гамильтонов подход к вращению многослойной Луны и вычислены моды свободных либраций, проведено моделирование периодов свободных либраций в зависимости от размера жидкого ядра, геохимического состава, динамического сжатия двухслойного ядра, приведены периоды и амплитуды свободных либраций.

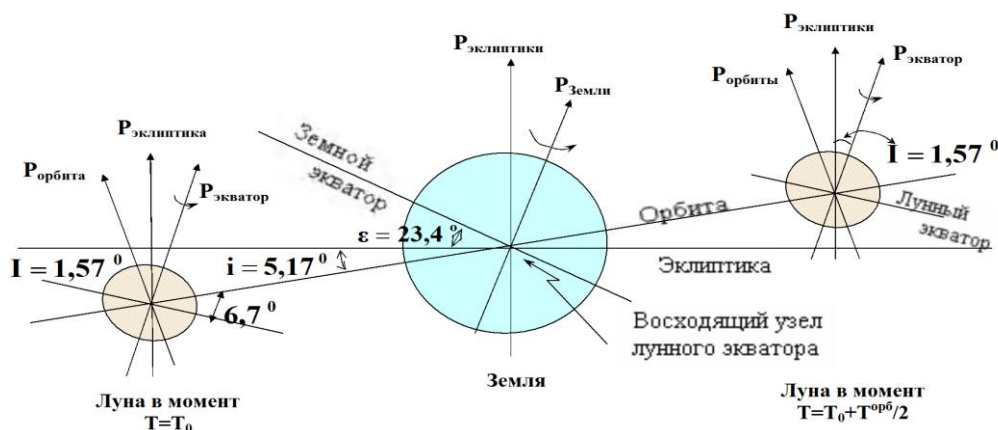


Рис.1 Вращение Луны по законам Кассини. Положение Луны показано в диаметрально противоположных точках лунной орбиты: в момент T_0 и через половину орбитального периода $(T_0 + T_{\text{орб}}/2)$. Оси вращения эклиптики $P_{\text{эклиптики}}$, лунной орбиты $P_{\text{орбиты}}$ и лунного вращения $P_{\text{экватора}}$ лежат в одной плоскости – плоскости Кассини.

В параграфе 2.3 анализируется строение и динамика лунного ядра, демонстрируются аргументы в пользу существования сложного двухфазного лунного ядра – внутреннее железное твердое ядро и внешнее жидкое эвтектическое ядро, представлен геофизический разрез ядра Луны.

Существует несколько аргументов в пользу существования у Луны железного ядра небольшого размера, до 600 км с малой примесью серы и/или кислорода, и горячей вязкой нижней мантии.

Структура гравитационного поля Луны, выявленная из сопоставления высокоточных траекторных измерений Lunar Prospector с результатами лазерной альтиметрии, проведенной с борта Clementine, а также с данными лазерной локации Луны (1970-2006), предполагает возможность наличия металлического ядра. Современное

определение величины полярного момента $\frac{C}{MR_M^2} = 0.39232 \pm 0.0002$ согласуется с железным ядром радиуса 220 – 450 км или с примесью серы 330 – 590 км (Konopliv et al, 2001).

Интерпретация значения полярного момента в рамках химических, тепловых и плотностных моделей лунной коры и мантии позволила сделать выводы о массе и размерах ядра. Таким образом, был получен скачок плотности от 3,8 г/см³ до 7,0 г/см³ на глубине примерно 1250 км - (Dickey et al., 1994; Kuskov, Kronrod, 1998, 2001).

Остаточная намагниченность лунных пород, выявленная миссией Apollo, говорит о сильном магнитном поле в несколько гауссов у Луны в период 3,9 – 3,1 млрд. лет тому назад, которое могло генерироваться благодаря динамо-механизму в жидком железном ядре в ранний период эволюции (Runcorn, 1996, Stegman et al, 2003)

Магнитометрические измерения, выполненные Lunar Prospector (1998), независимо подтверждают наличие металлического ядра радиусом 250 – 430 км.

Несовпадение центра масс и центра фигуры и переориентация осей инерции относительно оси вращения объясняется формированием лунного ядра только через 500 млн. лет после образования Луны, т.е. 4,1 млрд. лет тому назад (Runcorn, 1996).

Оценка числа Лява, выявленная при детальном анализе данных по дистанционному слежению LP (Konopliv et al, 2001), $k_2 = 0.025 \pm 0.003$, свидетельствует о частичном плавлении в вязкой нижней мантии на границе с жидким ядром, возможно, с образованием зоны в 200-300 км с ультранизкими скоростями сейсмических волн.

Анализ диссипации вращения Луны, полученной из ЛЛЛ (Абалакин, 1978), показал, что могут быть два источника диссипации: месячные твердотельные приливы и жидкое ядро, вращение которого отличается от вязко-упругой мантии (Williams et al., 2001; 2007). Оба эффекта были рассчитаны численным интегрированием уравнений вращения Луны, и, как результат, был получен радиус ядра $R_c = 352$ км для чисто железного ядра, и $R_c = 374$ км – для ядра с эвтектической композицией Fe-FeS. Лабораторные данные экспериментов при сверхвысоких температурах и давлениях, соответствующих условиям лунного ядра, дают значения плотности жидкого железа $\rho_c = 7$ г/см³, твердого железа – $\rho_c = 7,8$ г/см³, эвтектического состава Fe-FeS – $\rho_c = 5,3$ г/см³. В Табл. 1 представлены геофизические характеристики лунного ядра – плотность, давление, температура, теплоемкость и др. Данные в Табл. 1 собраны из различных источников: Spohn et al., 2001; Stegman et al., 2003 и др.

Расчеты показывают, что 1% – 5% серы в ядре сохранит ядро от затвердевания на протяжении времени жизни Луны. Так, для того, чтобы сохранить чистое железо в расплавленном состоянии, необходима температура 1600°C, в то время как точка плавления эвтектического состава Fe-FeS около 1000°C при соответствующем давлении. Распределение по глубине основных параметров внутреннего строения Луны, представленных в Табл. 1.

Таблица 1. Геофизические характеристики ядра	
Плотность ядра (средняя)	7396 кг м ⁻³
Плотность внешнего жидкого ядра (Fe-FeS)	5300 кг м ⁻³
Плотность внутреннего твёрдого ядра (Fe)	7800 кг м ⁻³
Давление в центре ядра	50 кбар
Давление на СМВ, 1300 км	45 – 47 кбар
Температура СМВ	1400° К
Температура ядра	1600° К
Начальная температура ядра (4,5 млрд.лет)	1800° К
Удельная теплоемкость ядра	675 Дж кг ⁻¹ К ⁻¹
Коэффициент вязкости ядра	1.5 × 10 ⁶ пуаз
Число Релея для ранней тепловой конвекции	(2.4-3.6) × 10 ⁵
Добротность Q	26 – 37
Удельное сопротивление ядра	10 ⁵ ом×м

структуры Луны особое значение приобретает изучение её **свободной либрации**. С одной стороны, из наблюдений ФЛЛ обнаружена заметная диссипация лунного вращения, и, как результат, свободные колебания должны бы к настоящему времени затухнуть. С другой стороны, эти же наблюдения показывают их присутствие в современном вращении Луны. Поэтому необходимо принимать во внимание тонкие спин-орбитальные эффекты при взаимодействии Луны с Землей, Солнцем, резонансное взаимодействие вращения Луны с Венерой, двух- и/или трехслойные модели нетвердой Луны с приливной и турбулентной диссипацией в мантии и ядре. Это может быть сделано в рамках Гамильтонова подхода, применяемого для описания вращения Земли (Баркин, Гусев, Петрова, 2004)

Аналитический метод Гамильтона, примененный для расчета вращения Земли (Getino, 1995), имеющей слоистую внутреннюю структуру, выявляет несколько частот нормальных мод либраций. Для Луны, которая моделируется как трехслойное тело с тремя эллипсоидальными слоями – твердая мантия, жидкое внешнее ядро и твердое внутреннее ядро (Рис.2) – в ее полярном вращении должно наблюдаться 4 типа колебаний (Рис. 3). Значения их частот получаются из соответствующих уравнений и зависят от размеров ядер, их химического состава и динамического сжатия (эллиптичности). Свободные моды есть результат несовпадения осей вращения мантии, внутреннего и внешнего ядер.

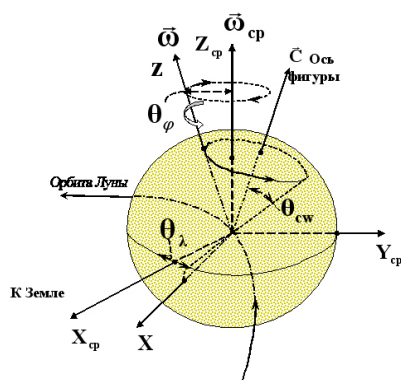


Рис.3 Свободная либрация Луны. \vec{C} – наибольший момент инерции. $\vec{\Omega}$, $\vec{\Omega}_{cp}$ – мгновенная и средняя скорости вращения Луны. Углы $\theta_{\sigma w}$, θ_{ϕ} , θ_{λ} – либрационные углы Чандлеровых колебаний, либрации по широте и долготе

Обнаружение этих мод из наблюдений позволяет с высокой степенью достоверности утверждать, что тело имеет внутри себя однородное эвтектическое жидкое или расслоенное жидко-твердое ядро. Более того, параметры свободных мод позволят определить такие важные характеристики внутреннего строения, как радиус ядра и его сжатие, скачок плотности на границе ядра и мантии.

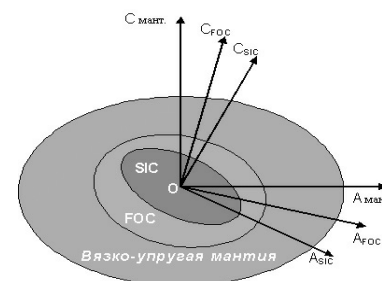


Рис.2. Схема трехслойной Луны

Чандлеровские колебания Луны (CW), представляющие собой движение оси вращения Луны относительно динамической системы координат (ДСК), вызванное эллипсоидальностью лунного тела и несовпадением оси вращения с главной осью инерции (Рис.3). Это мода вращения существует для твердой планеты. Для Луны она имеет большой период 74.6 года в системе координат, связанной с ДСК. Это движение полюса является **прямым**, т.е. осуществляется в направлении вращения Луны, оно обнаруживается в ЛЛЛ-наблюдениях как 3''×8'' эллиптическая компонента (Newhall, Williams, 1997). Характерное время затухания этой моды оценивается величиной 2×10^6 лет. Период Чандлеровских колебаний определяется формулой:

$$P_{CW} = \frac{P_{rot}}{2\sqrt{e_a e_b}} \frac{A_m}{A} \quad (1)$$

С учетом приливной диссипации в мантии и турбулентной диссипации на границе ядро-мантия формула (1) принимает следующий вид (Getino et al., 1997; 2000):

$$P_{CW} = P_{rot} \frac{A_m}{2A} \frac{1}{\sqrt{e_a e_b} \left(1 - \frac{A}{A_m} e_c - \frac{R_{diss} \cdot P_{rot}}{A_m} \right)} \quad (1a)$$

Свободная нутация ядра Луны (FCN) представляет дифференциальное вращение жидкого ядра относительно вращения мантии. Эта мода существует только в том случае, если ядро жидкое. Она имеет квази-суточный период в ДСК и описывает **обратное движение полюса**. Для Луны период FCN определяются по формуле:

$$P_{FCN} = -\frac{P_{rot}}{e_c} \frac{A_m}{A}. \quad (2)$$

В пространстве, т.е. в инерциальной системе координат, лунная FCN имеет большой период порядка 144 лет, если динамическая фигура ядра подобна мантии, или около 186 лет для динамически симметричного ядра с эллиптичностью e_c порядка 1×10^{-4} (Petrova, Gusev, 2001).

С учетом диссипации формула (2) преобразуется к виду:

$$P_{FCN} = -P_{rot} \frac{A_m}{A} \frac{1}{e_c + P_{rot} \cdot R_{diss} / A_c} \quad (2a)$$

Свободная нутация внутреннего ядра Луны (FICN) с эллиптичностью e_f – мода, которая относится к дифференциальному вращению внутреннего ядра по отношению к другим слоям Луны. Эта мода существует только для ядра, которое имеет внутреннюю твердую составляющую и внешнюю жидкую оболочку. Она также имеет квази-суточный период в ДСК и описывает **прямое движение полюса** и в ИСК имеет вид .

$$P_{FICN} = -\frac{P_{rot}}{\delta + \frac{A_s}{A_m} e_f} \quad (3)$$

Колебания внутреннего ядра Луны (ICW) с эллиптичностью e_s , отвечают за дифференциальное вращение оси фигуры внутреннего ядра по отношению к оси вращения всей Луны и вызваны эллиптичностью твердого ядра, имеющего избыток плотности по отношению к внешнему жидкому ядру. Эта мода также существует только для эллиптического твердого ядра, окруженного жидкой оболочкой, и соответствует **прямому движению полюса**.

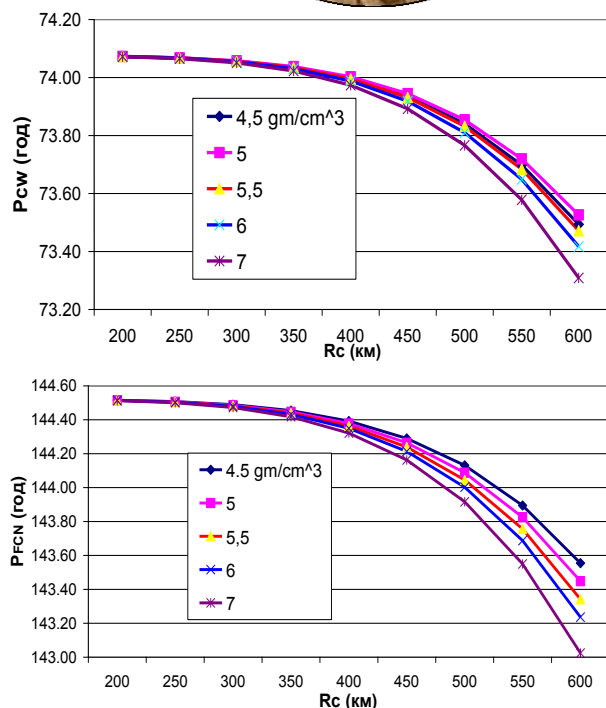
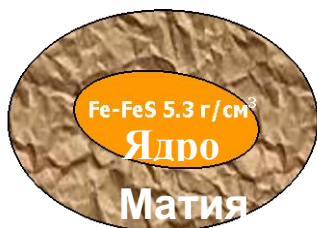


Рис.4. Двухслойная модель Луны с упругой мантией и жидким ядром. Зависимость периода PCW (сверху) и PFCN (снизу) от радиуса ядра для разных значений плотностей ядра Луны

$$P_{ICW} = \frac{P_{rot}}{2(e_s + \delta)} \quad (4)$$

Данные наблюдений ЛЛЛ (1970 – 2007) свидетельствуют о диссипации в жидком ядре Луны, поэтому делается вывод, что в настоящее время ядро не достигло своей конечной стадии – твердого состояния. Относительные размеры внутреннего и внешнего ядер зависят от начальной пропорции FeS и современной температуры ядра

С целью определения зависимости периодов свободных колебаний от различных параметров, характеризующих внутреннее строение Луны, было проведено компьютерное моделирование по формулам 1–4 для различных моделей внутреннего строения Луны. Расчеты и построение диаграмм осуществлялись в табличном процессоре Excel с применением программных модулей на языке VBA. Для числовых значений были приняты следующие положения:

- Параметры ядра – размеры, эллиптичность и плотность – выбирались в окрестности значений, полученных из ЛЛЛ-анализа (Williams, 2001; 2007).
- Эллиптичность SIC, бралась на 5% меньше эллиптичности FOC, как и в случае Земли.
- Диапазон размеров ядра R_c выбирался в диапазоне от 200 км до 600 км во всех моделях.
- Набор плотностей ρ_c для Модели 1: $4.5 \rightarrow 5 \rightarrow 5.5 \rightarrow 6 \rightarrow 6.5 \rightarrow 7$ (г/см³).
- Толщина жидкого ядра (FOC) варьировалась от 20% R_c до 60% R_c .

Нами было рассмотрено 3 модели Луны, состоящей из упругой мантии, жидкого внешнего ядра и внутреннего твердого ядра.

Модель 1a: Луна имеет твердую мантию и жидкое ядро различной плотности ($\rho_c = 5.3-7.2$ гр/см³): от эвтектического состава Fe-FeS с различной концентрацией серы (7%-15 % по весу) до чисто железного ядра Fe (Рис.5). Эллиптичность ядра принималась равной средней эллиптичности всей Луны: $e_c = (e_a + e_b)/2 = 5 \times 10^{-4}$. На графиках представлены зависимости периодов свободных либраций от радиуса для разных значений плотности.

Модель 1б: отличается от Модели 1а тем, что ядро рассматривалось чисто железным с плотностью 7 г/см^3 и с $e_c = 4 \times 10^{-4}$. Анализ диаграмм Рис.4 показывает, что зависимость периодов от плотности ядра сказывается только при радиусах, больших 400 км.

Модель 2: отличается от Модели 1 тем, что включалась диссипация с коэффициентом R_{diss} на границе ядро-мантия (СМВ).

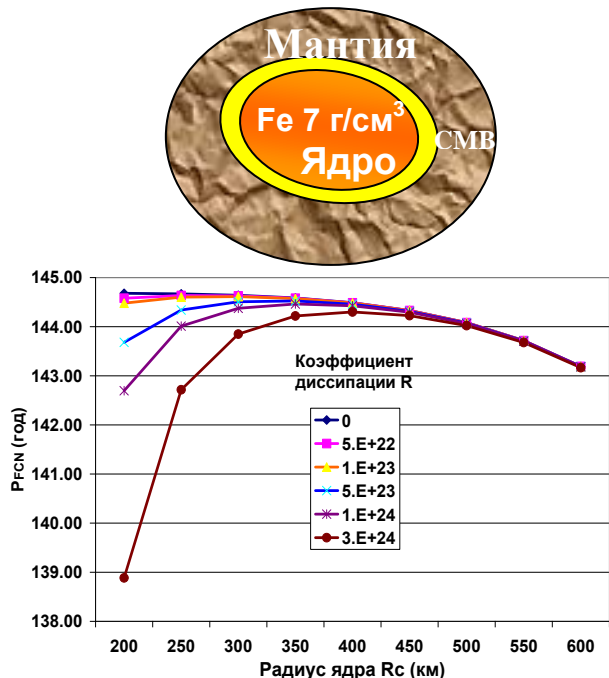


Рис.5. Диссипацией на СМВ (Модель2). Показана зависимость периода P_{FCN} от радиуса при разных значениях коэффициента диссипации R .

Рассчеты проводились по формулам (1а) и (2а). Набор значений для диссипативного фактора R_{diss} в Модели 2 выбирался в соответствии с данными Q , полученными из ЛЛЛ (Williams et al., 2001): $R_{\text{diss}} = 5 \times 10^{22} - 3 \times 10^{24}$ (Дж·сек). Результаты представлены на графике (Рис.6). Анализ моделирования периодов свободных либраций при различных значениях диссипативного фактора R_{diss} и размеров ядра показал: 1. Период $P_{\text{CW}} \approx 74 \text{ г.}$ почти не чувствителен к изменениям размера, плотности и диссипации ядра, т.к. внутреннее перераспределение плотности и фазового состава ядра при сохранении общих неизменных параметров всей Луны (полная масса, моменты инерции, динамическое сжатие) почти не влияют на чандлеровскую составляющую движения лунного полюса;

2. Период $P_{\text{FCN}} \approx 144 \text{ г.}$ существенно коррелирует с параметром диссипации при увеличении радиуса ядра до 400 км. Из зависимости P_{FCN} от радиуса ядра (Рис.5) следует интересный результат: существенное понижение периода колебаний FCN, что является важным индикатором выбора модели при интерпретации либрационных наблюдательных данных в предстоящих лунных миссиях.

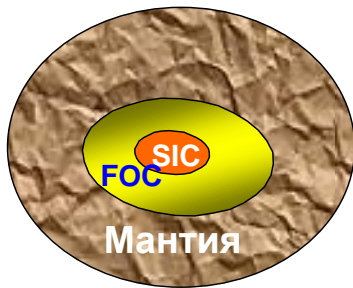


Рис.6. Трехслойная модель Луны (Модель 3). FOC – внешнее жидкое ядро. SIC – внутреннее твердое ядро

Модель 3: твердая мантия, жидкое внешнее ядро (FOC) твердое внутреннее ядро (SIC) (Рис.6). Плотность FOC бралась 5.3 г/см^3 (эвтектический состав 25 % веса S и 75 % веса Fe), а плотность SIC – 7.7 г/см^3 (твердое железо). Согласно расчетам (Stevenson, Yoder, 1981)

при массе серы в ядре от 4% до 13% по весу толщина жидкой оболочки составляет 65 - 180 км. На Рис.8 представлена зависимость периодов свободной нутации жидкого внешнего ядра P_{FCN} и свободной нутации внутреннего твердого P_{FICN} , колебания внутреннего твердого ядра P_{ICW} от радиуса ядра для различных значений толщины жидкого слоя. Толщина жидкого слоя дана в процентах от полного радиуса ядра для двух типов геохимического состава FOC.

Анализ результатов моделирования выявляет следующие интересные закономерности.

1. Зависимость всех типов периодов от радиусов ядра очень слабая (Рис.7): при изменении радиуса от 300 до 600 км периоды изменяются не более чем на 1%. Чувствительность к изменениям плотности выявляется только для радиусов, больших 400 км.
2. FCN-период очень сильно зависит от эллиптичности ядра. В то же время P_{sw} слабо зависит от эллиптичности, но более существенно от радиуса ядра.
3. При учете диссипации выявлено, что CW-период не чувствителен к ней: это внутренний процесс для Луны в целом и поэтому он не будет оказывать влияния на этот тип колебаний. Для FCN наблюдается сильная корреляция с диссипацией для радиусов меньших 400 км.
4. По сравнению с двухслойной моделью для CW и FCN вклад трехслойной модели не превышает 1 % в значениях периодов для всех типов ядер.
5. Общая тенденция в поведении периодов этих мод следующая: а) FICN-период уменьшается с ростом радиуса ядра и с толщиной жидкой оболочки; б) и, наоборот, ICW-период возрастает как с величиной радиуса ядра, так и с толщиной жидкой оболочки. Величины периодов для FICN и ICW были получены впервые.

В Табл. 2 значения периодов свободных либраций для многослойной Луны приведены к одному радиусу железного ядра $R_c=350$ км, $\rho_c=7$ г/см³ и для двух значений эллиптичности, коэффициента диссипации R и радиуса внутреннего ядра R_s .

Таблица 2. Значения периодов свободных либраций для трех моделей Луны					
Rc=350 км; ρ=7 г/см ³ ,					
Тип либрации	Модель1а e _c =5,17×10 ⁻⁴	Модель1б e _c =4×10 ⁻⁴	Модель2 e _c =5,17×10 ⁻⁴	Модель3 e _c =5,17×10 ⁻⁴	
CW	74.02 г.	74.03 г.	R _{diss} =5×10 ²² 74.03 г.	R _s =280км	74.08 г.
			R _{diss} =3×10 ²⁴ 74.03 г.	R _s =175км	74.02 г.
FCN	144.02 г.	186.88 г.	R _{diss} =5×10 ²² 144.58 г.	R _s =280км	144.52 г.
			R _{diss} =3×10 ²⁴ 144.22 г.	R _s =175км	144.52 г.
FICN			R _s =280км	634.22 г.	
			R _s =175км	515.90 г.	
ICW			R _s =280км	100.21 г.	
			R _s =175км	108.05 г.	

В Табл. 3 представлены периоды и амплитуды Чандлеровых колебаний, прецессии и долготной моды оси вращения Луны, полученных из данных ЛЛЛ (Newhall, Williams, 1997; Williams et al., 2001) и периоды и амплитуды свободных нутаций жидкого ядра P_{FCN} , свободных нутаций внешнего жидкого ядра P_{FICN} , колебаний внутреннего твердого ядра P_{ICW} , полученных при компьютерном моделировании. Ожидаемые амплитуды свободных либраций ядра – твердого и/или жидкого – лежат в диапазоне 1-3 мсек дуги (Petrova, Gusev, 1999 - 2007).

Последние данные, полученные миссией Клементины (Zuber et al., 1994) и LP (Konopliv et al., 1998, 2001) позволили с высокой точностью получить топографические и гравитационные карты аномалий лунной поверхности. И, если на видимой стороне наиболее заметные аномалии приурочены к бассейнам ударной природы, чем и объясняется их происхождение, то аномалии обратной стороны расположены на толстой континентальной коре, вне лавовых бассейнов, включая такие кратеры как Hertzprung (232 E, 1 N), Korolev (203 E, 4 S), Mendelev (141 E, 6 N), Freunlich-Sharonov (175 E, 18 N), и Moscoviense (147 E, 26 N).

В параграфе 2.4 анализируются модели гравитационного поля и динамической фигуры многослойной Луны на основе последних данных, обсуждаются значительные отклонения реальной фигуры Луны от равновесной и наличие заметных гравитационных аномалий на обратной стороне Луны, предлагается модель плюм-тектонического образования масконов на ранних этапах эволюции Луны.

В параграфе 2.5 излагаются современные проблемы при исследовании Луны, международные перспективы фундаментальных астрономических и геофизических исследований Луны на основе долговременных лунных баз, сформулированы концепция и основные положения лунного навигационного ежегодника для обеспечения оптических и радио наблюдений на поверхности Луны.

Таблица 3. Параметры свободных либраций Луны

<u>Чандлеровы колебания</u> амплитуда период	эллипс 8.10"×3.31" (69×28 м) 74.63 лет
<u>прецессия</u> амплитуда период	0.022" 24.16 год
<u>долготная мода</u> амплитуда период	1.4" 1056.12 дней
Свободная нутация жидкого ядра FCN амплитуда период	0.002" 144 – 186 лет
Свободная нутация внешнего жидкого ядра FICN амплитуда период	~0.001" 516-635 лет
Колебания внутреннего твердого ядра ICW амплитуда период	~0.003" 101-108 лет

В **третье главе** исследуются свободные либрации и нутации многослойных внутренних планет и естественных спутников солнечной системы. В параграфе 3.1 анализируется внутреннее строение многослойных твердотельных планет, делается вывод о наличии в каждой планете не менее трех слоев: твердой коры, вязко-упругой мантии и жидкого железного ядра. В параграфе 3.2 изучаются свободные либрации многослой-

ных моделей Меркурия и Венеры, выводятся формулы для периодов свободных либраций в рамках гамильтонова подхода Хетинго, моделируются различного типа либрации для геофизических и динамических параметров этих планет.

Моделирование *Меркурия* проводилось на основе данных наблюдений о его вращении и гравитационного поля. Ядро принималось осесимметричным и подобным динамической фигуре всей планеты. Для контроля адекватности моделирования параллельно рассчитывалось отношение главного момента инерции к мантии и с целью сравнения с наблюдаемым значением. Результаты расчетов представлены в Приложении CV диссертации. В отличие от Луны периоды свободных либраций Меркурия сильно зависят и от радиуса ядра и от его плотности.

Так увеличение плотности на 1 г/см^3 вызывает уменьшение периода P_{FCN} на 5%. (Приложение CVa). При этом отсутствие совпадений с наблюдаемым значением S_c/C позволяет не принимать во внимание плотности ядра меньшие 7 г/см^3 . Период Чандлеровых колебаний P_{CW} меняется от 310 до 400 лет (в системе координат планеты) и от 470 до 600 лет в инерциальной системе координат. Период свободных нутаций ядра P_{FCN} изменяется от 440 до 570 лет в инерциальной системе отсчета. Необходимы дополнительные ограничения из наблюдений, чтобы по периоду P_{FCN} делать выводы о параметрах ядра.

Для Венеры моделирование несколько отличается от того, что выполнено для Луны и Меркурия. Причина в том, что оценок плотности ядра не дается ни в каких источниках. Поэтому мы вычисляли плотность ядра и мантии по средней плотности с учетом заданного отношения полярных моментов инерции. Численные результаты моделирования представлены в приложении CVIa – CVIг. Контролем корректности вычислений служило полученное из наблюдений отношение масс ядра и всей планеты. Динамическая фигура Венеры – осесимметричная. Ядро – соответственно, тоже осесимметрично, но эллиптичность его больше. Контроль по отношению масс позволяет ограничить диапазон плотностей от 9 до 11 г/см³.

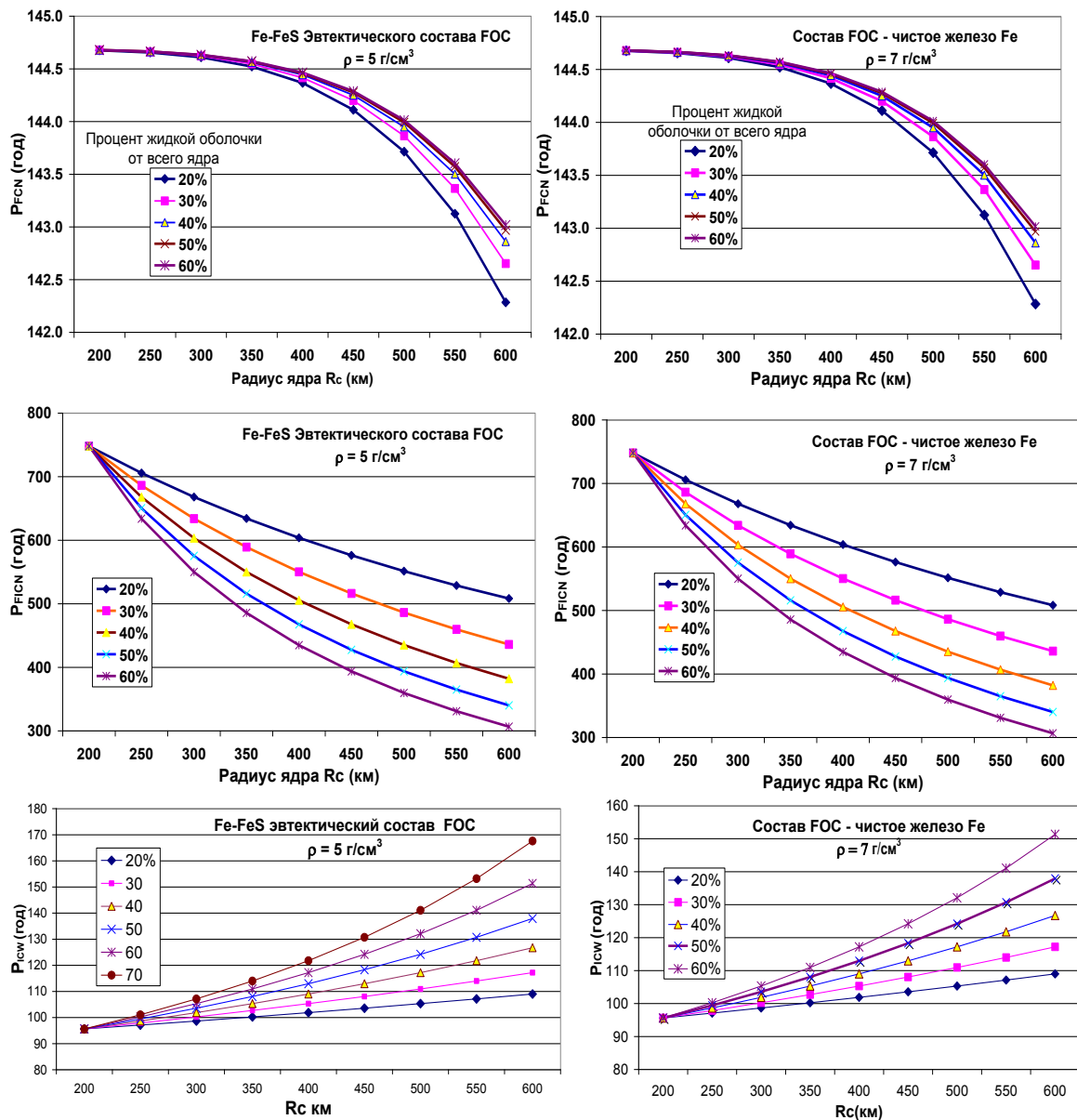


Рис.7. Модель 3. Поведение периодов свободных либраций трехслойной Луны в зависимости от радиуса Луны и толщины жидкой оболочки (FOC) для двух типов геохимического состава FOC (слева – эвтектический состав, справа – чистое железо). P_{FCN} – верхний рисунок. P_{FICN} – средний рисунок. P_{ICW} – внизу рисунка

Анализ трехмерной диаграммы моделирования периодов либраций показывает, что зависимость периода свободных нутаций ядра P_{FCN} от радиуса и плотности, практически, - линейная. Например, при уменьшении плотности на 5% период убывает на 3%. Диаграмма показывает зависимость от эллиптичности ядра, которую мы модели-

ровали в пределах допустимых изменений отношения полярных моментов инерции $\left(\frac{C_c}{C} \in [0,07;0,09]\right)$. Эта зависимость описывается слабо искривленной поверхностью и уменьшение эллиптичности ядра на 25% вызывает уменьшение периода на 21%. Таким образом, P_{FCN} существенно зависит от всех характеристик ядра. Поэтому однозначно охарактеризовать ядро Венеры можно лишь будет при получении дополнительных ограничений из других наблюдений. В результате моделирования мы получили, что период P_{CW} изменяется от 44630 до 46930 лет, P_{FCN} – от 1300 до 1740 лет. В Табл. 4 приведены данные по периодам свободных либраций планет земной группы. Данные по Земле и Марсу взяты из указанных в последнем столбце источников.

Таблица 4 Периоды свободных либраций внутренних планет и Луны					
Планеты	$\frac{A}{A_m}$	Ω 1 оборот за планетарный день	Периоды свободных либраций		Ссылки
Earth	1.12	$\frac{1}{24h}$	P_{CW}	433 d	Krasinsky, Lambert, 2006; Herring et al. 2002; Getino et al., 1997- 2001; Ferrandiz, Barkin, 2000.
			P_{FCN}	430.23 d	
			P_{FICN}	445–737 d	
			P_{ICW}	896 – 5764 d	
Mars	1.02 - 1.08	$\frac{1}{23h}$	P_{CW}	190 – 208 d	Van Hoolst et al, 2000; Dehant et al., 2003 Defraigne et al., 2003
			P_{FCN}	230–280 d	
			P_{FICN}	360 – 680 d	
			P_{ICW}	440 – 1150 d	
Moon	1.000065	$\frac{1}{27d}$	P_{CW}	74-75 yr	Eckardt, 1981;Williams, 2001
			P_{FCN}	144 – 186 yr	Petrova, Gusev,1999, Barkin, 2004
			P_{FICN}	515 – 634 yr	
			P_{ICW}	100 – 108 yr	Gusev, Petrova, 2004-2005
Mercury	1.68	$\frac{1}{59d}$	P_{CW}	562 – 1033 yr	Peale, 2005
				964 yr	Rambaux, Bois, 2004;
				1013-1017 yr 470 – 600	Barkin, 2004;
			P_{FCN}	472–538 yr	Gusev, Petrova, 2005 – 2006
Venus	1.084	$\frac{1}{243d}$	P_{CW}	45600–47200 yr	Gusev, Petrova, 2005-2006
			P_{FCN}	1500 – 1590 yr	

Вычисленные большие значения периодов свободных либраций для Луны, Меркурия и, особенно, Венеры объясняются, в первую очередь, их медленным вращением по сравнению с Землей и Марсом. Луна к тому же имеет очень маленькое ядро (не более 4% от общей массы планеты), поэтому, отношение моментов инерции

всей планеты и мантии, определяющее величину периода свободных либраций, мало отличается от единицы.

Определить эллиптичность ядра каким-либо прямым способом из наблюдений не представляется возможным. Но, зато в случае определения FCN из наблюдений, например, физической либрации Луны, проведенное моделирование позволит наложить дополнительное ограничение на эллиптичность ядра. В свою очередь, при определении параметров упругости Луны - чисел Лява - именно незнание эллиптичности вносит наибольшую неопределенность. Таким образом, такое, хотя и сложно определяемое явление, как свободное движение полюса планеты, может помочь в уточнении параметров внутреннего строения планеты. В параграфе 3.3 описывается физическая либрация по долготе однородных спутников больших планет, приводятся значения периодов и амплитуд либраций, выделяются наибольшие по амплитуде и экваториальному смещению спутники планет.

Ожидаемые значения амплитуд вынужденной либрации по долготе, полученные в предположении однородности тела спутника в состоянии гидростатического равновесия, могут быть использованы для сравнения с наблюдаемыми значениями амплитуд либрации и оценки жидкой составляющей ядра спутника. Например, в рамках программы полета КА "MESSENGER" (слежение за спутником с Земли и лазерная альтиметрия поверхности Меркурия) и радарного эксперимента предполагается измерить амплитуды физической либрации Меркурия. Если у Меркурия существует внешнее жидкое ядро (а к этому утверждению есть все основания), которое вращается независимо от мантии планеты, то амплитуда наблюдаемых либраций мантии будет существенно больше, чем предсказывает теория (Приложения D). Это будет важным косвенным свидетельством наличия большого внешнего жидкого ядра Меркурия (Peale, 2007). Аналогично, можно использовать этот подход для изучения внутреннего строения спутника Европа.

В параграфе 3.4 исследуются диссипативные явления и связь их с геологический вулканической активностью планет и спутников в настоящее время и на ранних этапах эволюции Солнечной системы. Оценивается роль приливной и турбулентной диссипации на эволюцию системы Земля-Луна. Существует и рассматривается интересная возможность глубокой связи орбитальной истории, физической либрации (Ерошкин, 1985) и лунной геофизики при резонансном режиме вращения системы Земля-Луна (Krasinsky, 2002). Дифференциальное вращение лунного ядра, вызванное солнечно-земными приливными эффектами, совместно с приливным вековым замедлением вращения всей Луны может вызвать спин-орбитальный резонанс в ранней истории вращения Луны. Как следствие этого резонанса, предсказывается увеличение эксцентриситета лунной орбиты и увеличение энерговыделения в теле Луны (Gusev, Petrova, 1999).

Энергия спин-орбитального движения за счет эффектов трения на границе ядро-мантия преобразуется в тепловую энергию, которая становится неустойчивой на границе ядро-мантия по отношению к образованию мантийных плюмов, увеличению температуры лунного ядра, усилению генерации начального магнитного поля. В результате также происходит плавление вещества в недрах Луны (океан магмы). Следствием этого бурного этапа появляются крупномасштабные эпизодические образования в лунной коре, обновление геохимического и поверхностного резервуаров и относительно быстрые изменения первичного магнитного полюса Луны. Мощность диссипации в турбулентном пограничном слое Луны оценивается величиной $(1.9 \pm$

$0.5 \cdot 10^{22}$ эрг год^{-1} . Это слабый источник нагрева в настоящее время, но в прошлом он может быть очень важным.

Энергия диссипации могла быть существенно выше на раннем этапе эволюции, когда Луна была ближе к Земле, а максимум диссипации наблюдается на расстоянии 200 000 км между Землей и Луной. Другая возможность: Луна могла проходить различные спин-орбитальные резонансы с существенным изменением орбитальных и вращательных элементов.

В течение резонансного перехода диссипация ядра составляет $\sim 10^{27}$ эрг $\cdot\text{год}^{-1}$, обеспечивая поддержания ядра в жидком состоянии и современного размера. Турбулентная энергия выделяется с нарушением сферической симметрии; при зависимости этой энергии от относительной скорости в третьей степени в полярной области выделяется энергии в 2.36 раз больше, чем в экваториальной области. Такое распределение энергии эффективно обеспечивает конвекцию в динамо-механизме. Если существует внутреннее ядро, то часть энергии выделяется на внутренней границе жидкого ядра. Если диссипация ядра являлось источником генерации палеомагнитного поля, то период сильной магнетизации пород должен сопровождаться высоким приливным выступом (горбом) в период изменения состояния вращения; генерация энергии должна уменьшаться резко, и конвекция останавливается по мере выхода из резонанса и удалении Луны от Земли. В течение спин-орбитального перехода в расплавленном лунном ядре генерируется максимальная энергия (10^{27} эрг год^{-1}), которая сохраняется в объеме меньшем, чем 1% от полного лунного объема.

Мы исследовали нелинейные уравнения для описания эволюции мгновенной оси вращения многослойного небесного тела с вязкоупругой мантией и однородным невязким жидким ядром. Эти уравнения позволяют нам изучить влияние жидкого ядра на вращение оси многослойной модели, предполагая квази-жесткий характер дифференциального вращения ядра. В линейном приближении для движения полюса Луны мы нашли две собственные частоты, отвечающие чандлеровому колебанию с периодом в 74 года и свободной нутации жидкого ядра с периодом в 144 года в инерциальной системе координат для двухслойной модели с диссипацией и четыре собственные частоты либраций для трехслойной модели небесного тела. Поле либрационных смещений может рассматривать и как дополнительный источник тепла по сравнению с генерации тепла от приливных деформаций. Для многих спутников либрационная и приливная диссипация может быть важным источников пополнения теплового бюджета небесного тела. В то время как приливные деформации носят сферoidalный характер, поле либрационных смещений ближе к тороидальному типу деформаций.

В четвертой главе проведен качественный анализ уравнений захвата в резонансное вращение на плоской орбите под действием гравитационных и приливных моментов методами теории бифуркаций.

В параграфе 4.1 представлены основные уравнения захвата в резонансное вращение на эллиптической орбите, записана система дифференциальных уравнений первого порядка, удобная для проведения качественного анализа динамических систем.

В параграфе 4.2 проведен полный анализ системы дифференциальных уравнений гравитационного захвата в резонансное вращение динамически-симметричного упругого тела под действием гравитационных и приливных моментов, получены координаты состояния равновесия, исследованы характеристические уравнение в зависимости от трех параметров модели, построены семьдесят девять фазовых портретов

на плоскости и на цилиндре, определен их тип, описана галерея из 39 разнообразных, часто топологических различных портретов (Рис.8, 9).

Параграф 4.3 посвящен анализу структуры пространства параметров и геометрии бифуркаций (Рис.10). Методами теории бифуркаций было получено разбиение фазового пространства параметров на двадцать одну область, выявлены все простые и сложные состояния равновесия, а также построены галереи фазовых портретов, иллюстрирующие все этапы захвата небесных тел в резонансное движение (Рис.8, 9).

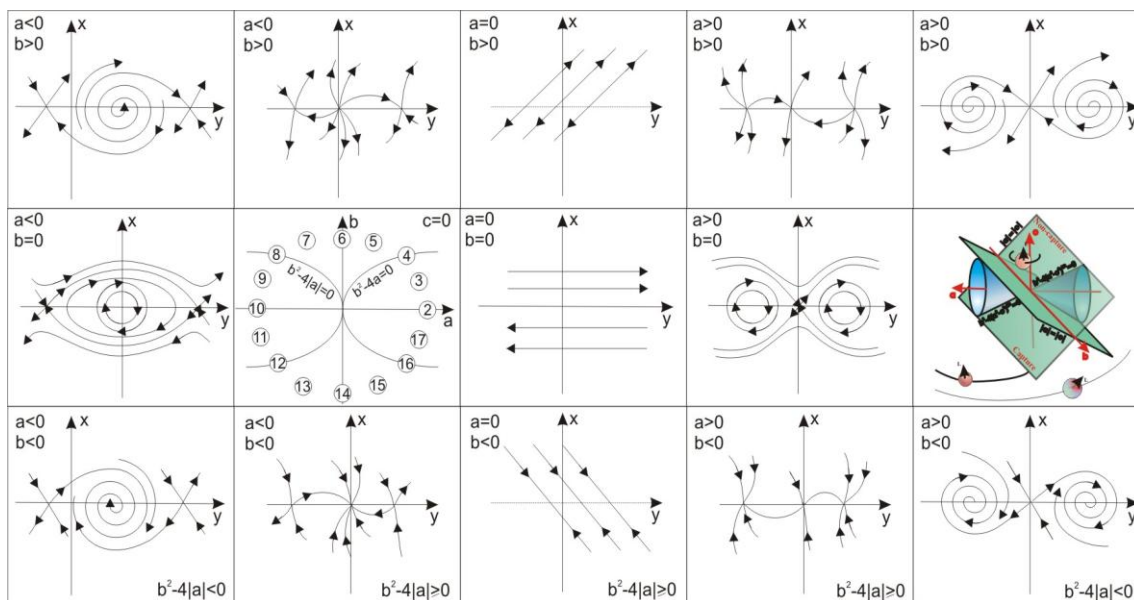


Рис.8 Галерея фазовых портретов для случая $c=0$

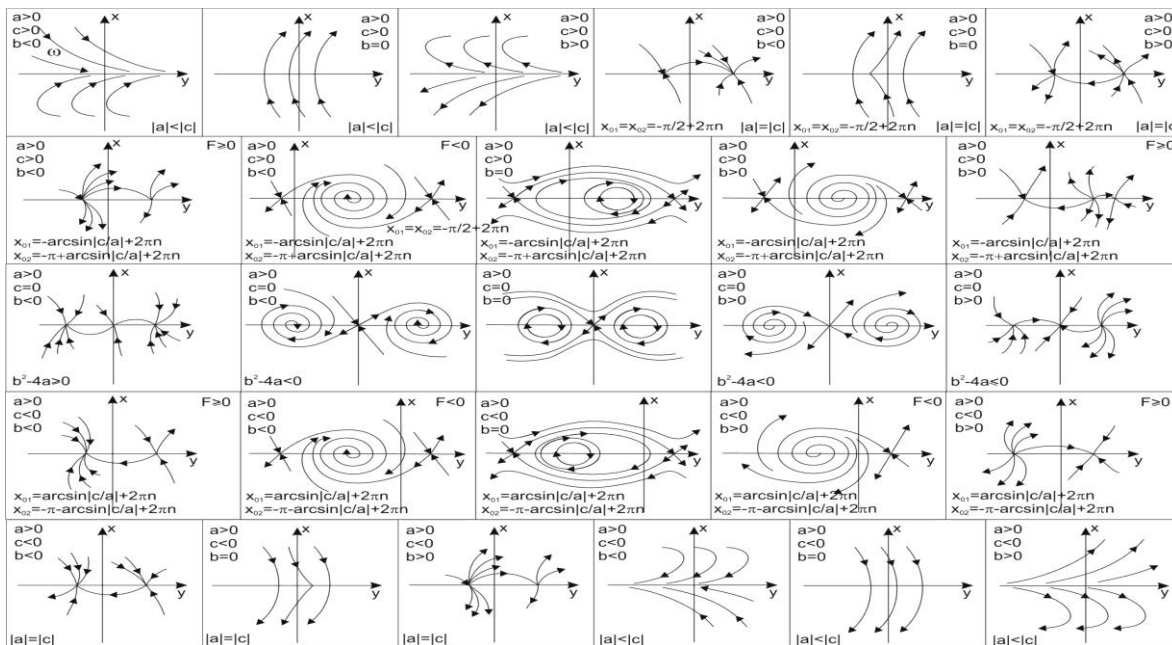


Рис.9 Галерея фазовых портретов для случая $a \neq 0, b \neq 0, c \neq 0$

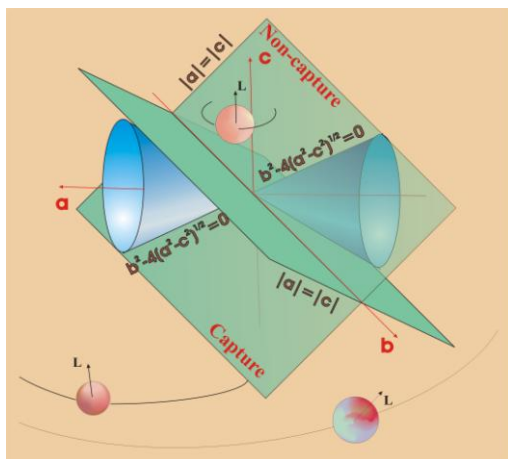


Рис.10 Геометрия бифуркационных структур:

- 1) осей $a=0, b=0, c=0$,
- 2) плоскостей $|a| = |c|$ и поверхности $b^2 - 4(a^2 - c^2)^{1/2} = 0$

в резонанс не зависит от динамического сжатия $(B - A)/C$ и приливного фазового угла δ . Вероятность зависит от параметра резонансности p и эксцентриситета e

В пятой главе описаны методы исследования нерезонансного вращения динамически-симметричной планеты под действием гравитационного и магнитного возмущений. В параграфе 5.1 изложены основные эффекты и закономерности вращательной эволюции планеты под действием гравитационных, магнитных моментов с учетом эволюции орбиты динамически симметричного небесного тела.

Параграф 5.2 посвящен описанию исследования динамической системы, описывающей вращательную эволюцию динамически-симметричной экзопланеты под действием гравитационных, магнитных моментов с учетом эффектов эволюции орбиты:

$$\dot{x} = \alpha \cos y, \quad (5)$$

$$\dot{y} = \beta - \alpha \operatorname{ctgx} \sin y + \gamma \cos x,$$

где α и β – параметры, описывающие влияние магнитных моментов и эволюции орбиты планет, параметр γ описывает влияние гравитационных моментов, выведенной Белецким, методами качественного анализа и теории бифуркаций.

При исследовании (5) нами последовательно исследовались все частные случаи, когда хотя бы один из параметров α , β или γ равен нулю, а затем общий случай: $\alpha \neq 0$, $\beta \neq 0$, $\gamma \neq 0$. Система уравнений (5) зависит от угловых переменных x и y , поэтому естественно изобразить полученные фазовые портреты на сфере.

В параграфе 5.3 описываются и анализируются полученные в результате исследования 64 фазовых портрета на плоскости и двумерной сфере, иллюстрирующих разнообразную вращательную эволюцию планет.

В случае, когда $\alpha = 0$, $\beta \neq 0$, $\gamma \neq 0$ фазовые портреты содержат «особую» траекторию, состоящую из особых точек (ОТ). В зависимости от соотношения параметров β и γ «особая», траектория перемещается относительно оси x , в одну особую точку на полюсе сферы и исчезает. При $\alpha \neq 0$, $\beta \neq 0$, $\gamma = 0$ фазовые портреты на плоскости и на сфере имеют следующие свойства: 1) все ОТ имеют характер центра; 2) смещение особых точек; 3) разрушение особых точек; и 3) наличие симметрии расположения траекторий относительно центра сферы и начала координат на фазовой плоскости.

При $\alpha \neq 0$, $\beta = 0$, $\gamma \neq 0$ структура фазовых портретов и их эволюция при $\alpha \neq 0$, $\beta = 0$, $\gamma \neq 0$ описываются следующими свойствами: 1) в зависимости от соотношения

параметров α и γ имеют место две или четыре особые точки; 2) слияние двух центров и седла, расположенного между ними, приводит к образованию топологического седла или центра; 3) в течение миграции особых точек и их бифуркации одно из состояний равновесия остается неизменным. Вывод в пункте 1 подтверждает ранние исследования Белецкого (1995).

Если выполняется неравенство $\alpha < \gamma$ ($\alpha > 0, \gamma > 0$), то фазовый портрет состоит из четырех ОТ: три из них имеют характер центра и одна – седла. Сепаратрисы седла разбивают поверхность сферы на три области, содержащие по одному центру (Рис.11а). Фазовый портрет, изображенный на рисунке 11а был получен так же Белецким (1995). Уменьшение параметра γ и увеличение α приводит к миграции двух центров к ОТ типа седла. При значении $\gamma = \alpha$ происходит слияние двух центров и седла, и перестройки фазового портрета, в результате которой простое седло деформируется в сложное топологическое седло (Рис.11б). Когда $\alpha > \gamma$, образовавшееся топологическое седло исчезнет с образованием на его месте центра (Рис.11в).

Случай $\alpha \neq 0, \beta \neq 0, \gamma \neq 0$ объединяет все выше перечисленные свойства для рассмотренных режимов: 1) $\alpha = 0, \beta \neq 0, \gamma \neq 0$; 2) $\alpha \neq 0, \beta \neq 0, \gamma = 0$; 3) $\alpha \neq 0, \beta = 0, \gamma \neq 0$. Условие $\beta \neq 0$ сохраняет тип особых точек, соответствующих случаю $\alpha \neq 0, \beta = 0, \gamma \neq 0$ и приводит к их смещению на малую величину. Исключения составляют только случаи, когда один из параметров равен нулю, так как это состояние соответствует набору из семи фазовых портретов, уже описанных, при более простых соотношениях параметров.

Параграф 5.4 включает анализ бифуркационных кривых и поверхностей в нулевом, первом и втором приближениях, разбивающих пространство параметров на топологически различные состояния равновесия.

Интерпретация полученных фазовых портретов в зависимости от соотношения гравитационных и магнитных возмущений, а также влияния эволюции орбиты приведена в параграфе 5.5.

В системе (5) нами была осуществлена следующая замена переменных: $\rho = x, \Sigma = y, d\rho/dM = \dot{x}, d\Sigma/dM = \dot{y}$ $\alpha = k_\Sigma \sin \rho^*, \beta = k_\Sigma \cos \rho^*, \gamma = 2k_g$, где ρ и Σ – углы, ρ^* – фиксированное направление описывающие ориентацию вектора кинетического момента планеты \vec{L} в орбитальной системе координат XYZ (Рис.12), параметр k_Σ описывает эффекты, связанные с эволюцией орбиты планеты и взаимодействия магнитного поля планеты с внешним магнитным полем, k_g – учитывает возмущения гравитационной природы, M – средняя аномалия.

При учете влияния только магнитных моментов и эволюции орбиты экзопланеты на сфере существует два состояния равновесия, в окрестности которых эволюция вектора \vec{L} представляет собой прецессию. Если угол $\rho^* = 0$ ($\alpha = 0, \beta \neq 0, \gamma = 0$) вращение планеты будет иметь характер прецессии вокруг нормали к плоскости орбиты. Данный результат ранее был получен Белецким (1995). Возможен режим, когда прямое вращение планеты будет периодически меняться на обратное. Если вектор кинетического момента будет прецессировать от стационарной точки на расстоянии $\Delta^* > 90^\circ - \rho^*$. В случае $\rho^* = 90^\circ$ ($\alpha \neq 0, \beta = 0, \gamma = 0$), вращение экзопланеты будет характеризоваться периодической сменой прямого вращения на обратное и наоборот.

Учитывая влияние гравитационных возмущений, магнитных моментов и эволюции орбиты и предполагая, что $\rho^* = 0^\circ$ (совпадает с нормалью к плоскости орбиты) вращательная эволюция ($\alpha = 0, \beta \neq 0, \gamma \neq 0$) будет иметь характер прецессии вокруг

нормали к плоскости орбиты. Данный эффект ранее был замечен Белецким. В случае $\rho^* = 90^\circ$ (лежит в плоскости орбиты экзопланеты, $\alpha \neq 0, \beta = 0, \gamma \neq 0$) картина вращательной эволюции экзопланеты будет более разнообразной.

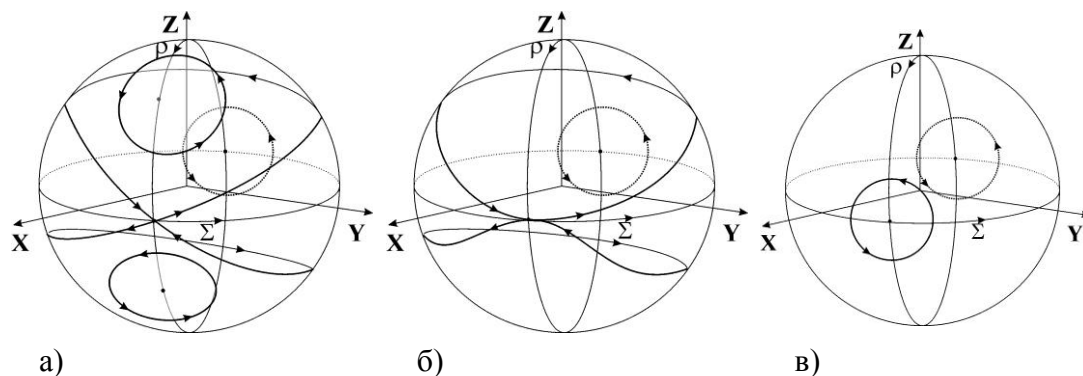


Рис.11. Фазовые портреты при $\alpha \neq 0, \beta = 0, \gamma \neq 0$

При преобладающем влиянии гравитационных моментов ($k_\Sigma < 2k_g$) на сфере существуют четыре стационарные точки, три из которых являются устойчивыми (центры) и одна неустойчива (седло). Сепаратрисы седла разбивают сферу на три области. В окрестности двух особых точек вектор \vec{L} прецессирует на постоянном угловом расстоянии. Вокруг стационарной точки, расположенной между двумя сепаратрисами седла, вектор \vec{L} совершает либрационные колебания по вытянутым замкнутым траекториям с периодической сменой прямого вращения планеты на обратное вращение. По мере увеличения влияния гравитационных возмущений область либрации уменьшается за счет сближения сепаратрис седла, вызванная миграцией центров к нормали плоскости орбиты. Ослабление влияния гравитационных моментов по сравнению с магнитными и эффектами эволюции орбиты вызовет перемещение стационарных точек к состоянию равновесия «седло». Если $k_\Sigma = 2k_g$ слияние двух центров и седла приводит к образованию сложного седла.

Когда эффекты, связанные с эволюцией орбиты планеты и влияние магнитных моментов являются доминирующими по сравнению с гравитационными возмущениями ($k_\Sigma > 2k_g$), вектор кинетического момента будет прецессировать вокруг стационарной точки, лежащей в плоскости орбиты планеты.

При учете совместного влияния эффектов эволюции орбиты экзопланеты ($\alpha \neq 0, \beta \neq 0, \gamma \neq 0$), гравитационных и магнитных моментов построение фазовых портретов лишь при достаточной малости угла ρ^* все состояний равновесия и эволюционные траектории будут смещены от полюса сферы к плоскости экватора. Следовательно, при преобладании гравитационных возмущений над другими выделяются следующие три области, определяющие характер вращения небесного тела: 1) область обратного вращения экзопланеты; 2) область прямого вращения с возможностью реализации режима периодической смены прямого вращения планеты на обратное; 3) область либрационного движения вектора кинетического момента, внутри которой прямое вращение планеты периодически сменяется на обратное. В случае $k_\Sigma = 2k_g$ слияние двух центров и седла вызовет его деформацию седла с сохранением зоны либрации. При преобладании возмущений со стороны магнитных моментов и эволю-

ции орбиты $k_\Sigma > 2k_g$, ОТ с координатами $\Sigma = \frac{\pi}{2}$, $\rho = \frac{\pi}{2} +$ и $\Sigma = \frac{3\pi}{2}$, $\rho = \frac{\pi}{2}$ будут смещены к полюсу ($\rho = \pi$) на малые углы $\frac{\beta}{\gamma - \alpha}$ и $\frac{\beta}{\gamma + \alpha}$.

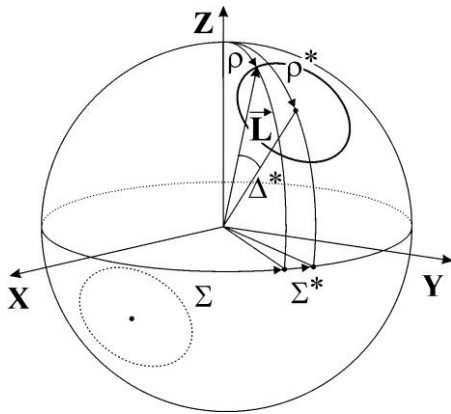


Рис.12 Система координат

Шестая глава посвящена исследованию вращательной эволюции планет и экзопланет под действием приливных моментов. В параграфе 6.1 описаны особенности влияния приливных моментов на вращательную эволюцию планет и их спутников в Солнечной системе, рассмотрен вопрос о влиянии приливов на эволюцию спутников вокруг Марса, описана приливная эволюция планеты Венеры.

В параграфе 6.2 анализируются эволюционные уравнения небесного тела под действие приливного возмущения, проводится качественный анализ динамической системы, построены фазовые портреты, сделаны астрономические приложения.

Рассмотрим эволюцию движения тела под действием только приливного момента. Чтобы не усложнять картины основных эффектов, рассмотрение проводилось для динамически-симметричной планеты, движущейся по невозмущенной эллиптической орбите ($A = B \neq C$, $A > C$). Исследование данной системы дифференциальных уравнений второго порядка будет проводить с помощью *теории качественного исследования динамических систем на плоскости и теории бифуркаций* при различных значениях параметров задачи.

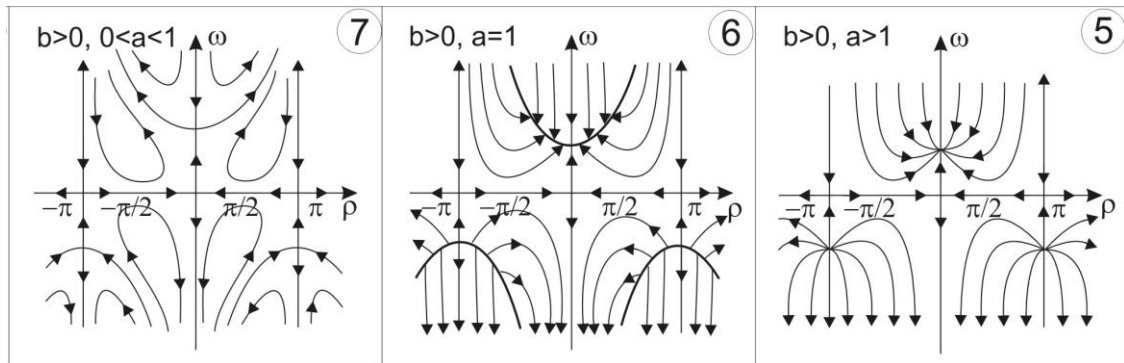


Рис.13 Неустойчивые седла(7), сложные узлы(6), устойчивый узел(5)

Фазовые портреты рассматриваемых систем, плоскость параметров (с прилагаемыми бифуркационными плоскостями) приведены на Рис.13 и в приложении А диссертации.

В параграфе 6.3 описаны особенности влияния приливных моментов на вращательную эволюцию планет и их спутников в Солнечной системе и экзопланет. Планеты внесолнечного типа, обращающиеся по очень «тесным» орбитам («горячие Юпитеры»), испытывают сильные приливные возмущения со стороны центральной звезды.

Параграф 6.4 включает краткое описание эволюционных уравнений, полученных Белецким (1995), для планеты, обращающейся по круговой орбите и имеющей центральный эллипсоид инерции близкий к сфере. В данном параграфе методами качественного анализа нами исследуются эволюционные уравнения, полученные

В.В.Белецким (1995), описывающие вращательную эволюцию планет при $e = 0$ под действием приливных моментов:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{dt} &= \frac{\alpha_0}{\zeta} \sin \rho (-1 + 0.5\zeta \cos \rho), \\ \frac{d\zeta}{dt} &= \alpha_0 \{ \cos \rho - 0.5\zeta(1 + \cos^2 \rho) \}, \end{aligned} \quad (6)$$

где ρ угловое расстояние вектора кинетического момента от нормали к плоскости орбиты планеты, $\zeta = L/B\omega_0$, B – главный момент инерции.

Согласно структуре системы уравнений (6), естественным отображением эволюционных треков на фазовой плоскости является цилиндр. Из четырех особых точек (Рис.14) две имеют характер седла, две – устойчивого и неустойчивого узлов. На рисунке 14 представлен фазовый портрет на плоскости и на цилиндре, иллюстрирующий эволюцию вектора кинетического момента экзопланеты под действием приливных возмущений. Две втекающие в седло сепаратрисы приходят из седла с координатами $\rho = \pi$, $\zeta = 0$, охватывают цилиндр и, следовательно, делят его на две части: «верхнюю» и «нижнюю». «Верхняя» часть характеризуется наличием устойчивого узла и приходом всех траекторий из бесконечности, «нижняя» – неустойчивого и оттока всех траекторий на $-\infty$. Таким образом, одна выходящая из седла ($\rho = 0$, $\zeta = 0$) сепаратриса вливается в устойчивый узел, другая уходит на бесконечность. Одна из входящих сепаратрис седла с координатами $\rho = \pi$, $\zeta = 0$ приходит из бесконечности, вторая – из неустойчивого седла.

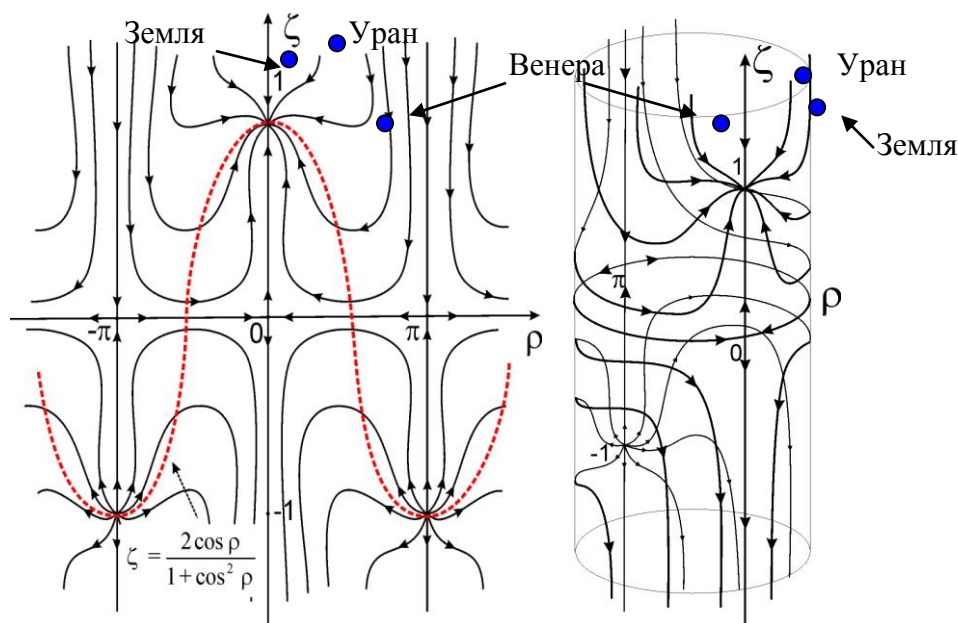


Рис.14. Фазовый портрет, описывающий вращательную эволюцию экзопланеты под действием приливных возмущений.

В параграфе 6.5 приводится анализ и интерпретация полученного фазового портрета (Рис.14) на плоскости и на цилиндре, описываются бифуркационная поверхность и ее сечения, определяющие различное поведение фазовых траекторий в окрестности состояний равновесия динамической системы, описывающей приливную эволюцию экзопланет.

Изменение поведения траекторий по ζ определяется кривой $\zeta = \frac{2 \cos \rho}{1 + \cos^2 \rho}$ (ра-

нее полученной Белецким (1995) при пересечении вектором \vec{L} и обозначает смену прямого вращения экзопланеты на обратное или наоборот. Впервые эффект смены прямого вращения на обратное вращение планет был открыт Белецким (1995). Согласно полученному фазовому портрету (Рис.14) под действием приливных возмущений вектор кинетического момента экзопланеты перемещается к плоскости орбиты планеты, что приводит к смене прямого вращения экзопланеты к обратному при $L < B\omega_0$. В случае $L > B\omega_0$, характер вращения планеты будет неизменным.

В **заключении** описываются основные результаты и выводы по всей диссертационной работе.

В **приложении А** диссертации приведена галерея из 64 фазовых портретов на плоскости и на сфере, разбиение пространства параметров.

В **приложении В** диссертации представлены результаты моделирования периодов свободных либраций многослойной Луны, Меркурия и Венеры в зависимости от размера жидкого ядра, плотности вещества ядра, состава ядра, диссипативной функции на границе ядро-мантия

В **приложении С** диссертации представлена галерея из 79 фазовых портретов захвата в резонансное вращение.

В **приложении Д** диссертации даются таблицы вынужденной либрации однородных регулярных спутников Солнечной системы

Литература

1. Абалакин В.К., 'Использование лазерных светолокационных наблюдений Луны для решения некоторых задач небесной механики и геодинамики', Бюллетень ИТА АН СССР, 1978, 17, с.82-133.
2. Белецкий В. В., Хентов А. А., 1995, Резонансные вращения небесных тел. Нижний Новгород, Нижегородский гуманитарный центр, 430 с.
3. Баркин Ю., Гусев А., Петрова Н., 2004. Современные исследования спин-орбитальной и внутренней динамики Луны: приложение к лунным космическим миссиям. Тр. Меж. астр. конф. «Основные направления развития астрономии в России», стр. 263-268.
4. Ерошкин Г.И., Численная модель физической либрации Луны, Бюллетень ИТА АН СССР, 1985, т. 15, N 9, с.511-518.
5. Getino J., 1995, An interpretation of the core-mantle interaction problem. Geophys. J. Int., v.120, p. 693-705.
6. Konopliv A.S., Asmar S.W., Carranza E., Sjogren W.L., Yuan D.N.: 2001, Recent gravity models as a result of the Lunar Prospector mission., Icarus, v.150, pp.1-18.
7. Krasinsky G.A., 2002, Dynamical history of the Earth-Moon system, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, v.84, pp. 27-55.
8. Kuskov O.L., Kronrod V.A., 1998, Constitution of the Moon, 5, Constraints on composition, density, temperature, and radius of a core, PEPI, 107, pp.285-306.
9. Peale S.J., Yseboodt M., Margot J.-L., 2007, Long-period forcing of Mercury's libration in longitude. Icarus, 187, pp.365-373.
10. Runcorn S.K.: 1996, "The formation of the lunar core", Geochimica et Cosmochimica Acta, v.60, No.7, pp. 1205-1208.

11. Spohn T., Konrad W., Breuer D., Ziethe R.: 2001, The longevity of lunar volcanism: Implication of thermal evolution calculation with 2D and 3D mantle convection models, *Icarus*, v.149, pp.54-65.
12. Stegman D.R., Jellinek A.M., Zatman S.A., Baumgardner J.R., 2003, An early lunar core dynamo driven by thermochemical mantle convection, *Nature*, v.421, p.143-146.
13. Williams J.G., Boggs D., Yoder Ch., Ratcliff J., Dickey J.: 2001. Lunar rotational dissipation in solid body and molten core. *J. Geophys. Res.*, v.106, No E11, p.27, 933-27, 968.
14. Williams J.G., 2007, A scheme for lunar inner core detection, *Geophys. Research Letters*, v.34, L03202, doi:10.1029/2006GL028185, 2007.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

Монографии

1. Гусев А.В., Петрова Н.К., 2008, “Вращение, физическая либрация и внутреннее строение Луны”, Монография, Изд-во Казанск. гос. ун-та, Казань, 208 с.
2. Гусев А.В., Петрова Н.К., Китиашвили И.Н., 2008, “Захват в резонансное вращение и физическая либрация многослойных планет и лун”, Монография, Изд-во Казанск. гос. ун-та, Казань, 194 с.
3. Гусев А.В., Китиашвили И.Н., 2008, “Вращательная эволюция внесолнечных планетных систем и пульсаров”, Монография, Изд-во Казанск. гос. ун-та, Казань, 252 с.

Статьи в рецензируемых периодических изданиях

4. Китиашвили И.Н., Гусев А.В., 2008, Чандлеровские колебания и нутации жидкого ядра нейтронной звезды, *Астрономический журнал*, т.85, N.1 с. 69-78.
5. Гусев А.В., Кавано Н., Петрова Н.К., 2007, Исследование и освоение Луны: научные достижения, фундаментальные проблемы, международные перспективы, “Актуальные Проблемы Авиационных и Аэрокосмических Систем, КАИ – EMBRY - RIDDLE Publisher., Россия - США, т.12, p.94 -128.
6. Гусев А.В., Кавано Н., Петрова Н.К., Ханада Х., 2008, "Физическая либрация и внутреннее строение многослойной Луны", *Астрономический вестник*, т.42 с. 1- 40
7. Petrova N., Gusev A., 2001, "New Trends in the Development of the Lunar Physical Libration Theory", *Celestial Mechanics & Dynamical Astronomy*, v. 80, Issue 3/4, p. 215-225.
8. Barkin, Yu., Gusev, A., Petrova, N., 2006, The study of the spin-orbit and inner dynamics of the Moon: Lunar mission application. *Advance in Space Research*, v.37, p.72-79
9. Gusev A., Petrova N., 2007, The Moon-2012+: Spin-orbit evolution, geophysics and Selenodesy of the Moon. *Advances in Space Research*, v.40, p.1-5 doi:10.1016/j.asr.2007.06.023.
10. Kitiashvili I., Gusev A., 2007, "Rotational Evolution of Exoplanets Under the Action of Gravitational and Magnetic Perturbations", *Celestial Mechanics & Dynamical Astronomy* v. 100, Issue 2, p.1- 25, doi: 10.1007/s10569-007-9106-5.
11. Kopeikin S., Pavlis E., Pavlis D., Brumberg V., Efroimsky M, Escape A, Getino J., Gusev A., Muller J., Petrova N., Ni W.-T., 2008, Prospects in the orbital and rotational dynamics of the Moon with the advent of sub-centimeter lunar laser ranging, *Advances in Space Research*, v.41, p.1-28, doi:10.1016/j.asr.2008.02.014 .

12. Petrova N., Gusev A., Hanada H., Kawano N., 2008, "Free librations of the two-layer Moon and the possibilities of their detection" *Advances in Space Research*, v.41, p.1-10 doi:10.1016/j.asr.2008.02.017.
13. Kitiashvili I., Gusev A., 2008, "Inner Core Wobble and Free Core Nutation of Pulsar", *Advances in Space Research*, v.41, p.1- 12, doi:10.1016/j.asr.2008.02.016.
14. Gusev A., Kitiashvili I., 2006, Precession of Inner Core and Free Nutation of Outer Core for Pulsar PSR B1828-11, *Gravitation and Cosmology*, v.12, No. 1, pp. 59-64
15. Petrova N., Gusev A., Heki K., Hanada H., Kawano N., 2002, "Physical librations of the Moon: the results and the perspectives". *IAA Transactions*, v. 8, p.143-145.
16. Gusev A., Petrova N., Kawano N., 2002, "FCN-period dependence on dynamical characteristics of a lunar core". *IAA Transactions*, v. 8, p.83-85.
17. Gusev A., Kitiashvili I. 2002 Precession and free core nutation of neutron stars. *IAA Transactions*, v. 8. p.81-82.
18. Gusev A., Kitiashvili I. 2003. Spin-orbital evolution of the exoplanets. *EAS Publ. Series*, EDP Sciences Publisher, Paris, v. 6, p. 281-283.
19. Gusev A., Kawano N., Petrova N., 2003. Gravitation Investigations on the SELENE mission and the existence of a lunar core. *Astron. & Astrophysics Transaction*, v. 22, pp 579-584.
20. Gusev A., Kitiashvili I., 2004, Resonances in the exoplanetary systems and free-core nutation of pulsars PSRB1828-11. *Journal of Dynamical and Control Systems*, Plenum Publishing Corp, USA. v.10, N1, pp 120-122.
21. Gusev A., 2004. Nutations and liquid core of the Moon. *Bulletin of NAOJ*, Mitaka, Tokyo, No.134, p.13-14 (in Japanese).
22. Gusev A., Kawano N., 2005, Rotation and Internal Structure of the Moon. *Annual Reports of NAOJ: Highlight publications*, Mitaka, Tokyo, pp.1-2 (in Japanese)
23. Kitiashvili I., Gusev A., 2004, Early evolution of the planetary system around PSR B1257+12. *ASP Conf. Ser.*, " Planetary systems in the Universe", USA. v.313, p.187-189.
24. Kitiashvili I., Gusev A., 2004, Extra-solar planets: from direct rotation into reverse rotation. *ASP Conf. Series " Planetary systems in the Universe"*, USA, v.313, p.205-207.
25. Kitiashvili I., Gusev A., 2000 "Exoplanets: status and outlook", *Georesources*, v.3, p.26-30.
26. Gusev A., Kitiashvili I., 2001, "Analyses of non-linear effects of magnetic convection on the Earth's outer core boundary. "Georesources", v.5, p.34-36.
27. Gusev A., Kitiashvili I. 2001 /2002 Nonlinear magnetoconvection in outer core of the Earth, "Georesources", v. 6, p. 32-36.
28. Gusev A., Kitiashvili I., 2005. Chandler Wobble and Free Core Nutation of Pulsar. "Georesources", v.9, p. 41-43.
29. Petrova A., Gusev A., Petrova N., 2008, Plume tectonics of the Earth, the Moon and planets: review. "Georesources", v. 11, pp.1-10.
30. Gusev A.V, Alexandrov, V.K., 1996, "New possibility of Geotectonic Technology." *Europ. Geoph. Soc., XXI Europ. Geophys. Assembly*, Hague, 1996, *Annales Geophysicae*, v.14, I, p.154-155.
31. Gusev A., Petrova N., 1998, "Hot spots on the Craton and exogenetic manifestation of lunar plume", *Annales Geophysicae*, v.16., suppl.III, p.42-43.

Статьи в рецензируемых трудах конференций

32. Gusev A.V., Salangina O.A. 1995, Bifurcations of the gravitational capture at resonance rotation. Proc. conf. "Dynamic. Systems and Chaos", Tokyo, World Sci. Publ., v.2, p.418-421.
33. Gusev A., 1997, Gravitational capture to resonance rotation of the early Moon in General Relativity and Gravitation. Dynamics and astrometry of Natural and Artificial Celestial Bodies". Proc IAU Colloquium 165, Poznan, Kluwer Acad. Publ , p. 215 - 220.
34. Petrova N., Gusev A., 2005. Modeling of the Free Lunar Librations. 36th Lunar and Planetary Science Conf., March, 2005, Houston, "Lunar Geophysics", #1448, p.1-2..
35. Gusev A., Kawano N., Petrova N., 2005. Fine Phenomena of the Lunar Librations. 36th Lunar and Planetary Science Conf., Houston, "Lunar Geophysics", #1447, p.3-4.
36. Petrova N., Gusev A., 2006. Normal modes in rotation of earth-like planets. 37th Lunar and Planetary Science Conf., March 17-23, 2006, Houston, # 1669, pp. 1-2.
37. Petrova N., Gusev A. 2007, Core-Mantle Dissipation and Free Libration in the Two Layer Moon, 38th Lunar and Planetary Science Conf., 2007, Houston, #2199, p.1-2
38. Gusev A. & Petrova N, 1997, "Qualitative and Bifurcation Analysis of Capture at Resonance Rotation". Proc. of All-Russian Conference with intern. participation "Problems of Celestial Mechanics". ITA RAS, St.-Petersburg, Russia, 1997, p.17-19.
39. Petrova N., Gusev A., 1998, "Clue about the planet interior: convective motion and core-mantle rotation in the Earth and the Moon". Proc. Int. Conf. "Geom. of Phys. III", Kazan Univ. Press, p.124-136.
40. Gusev A., Kitiashvili I., 1999, Rotation of extra-solar planets: Qualitative and bifurcation analyses. Proc. of Int. Conf. "Geom. of Phys. IV", Kazan Univ. Press, p. 115-123.
41. Gusev A., Petrova N., 1999, "Core-mantle interaction and possible convective motion in the Moon." Proc. of Int. Conf. "Geom. of Phys. IV", Kazan Univ. Press, p. 88-94.
42. Rizvanov N., Gusev A., Petrova N., 1999, "Modern advances and problems in the investigations of the lunar figure (Review), Proc. Int. Conf. "Geom. Phys. IV", Kazan, p.95-106.
43. Petrova N., Gusev A., 2001, "Modelling of some parameters of the lunar elliptical core on the basis of free core nutation of the Moon", Proc. of Conf. "ASTROKAZAN'2001", Sept. 24 - 28, 2001, Kazan Univ. Press, Russia, p.265-270.
44. Gusev A., Kitiashvili I., 2003, Long-term, highly periodic variations and Free-Core Nutation of pulsar. Proc. Int. Conf. "New Geometry of Nature", Kazan Univ. Press, v.3, p.80-87
45. Gusev A., Petrova N., 2003, Heat flux from the lunar core. Proc. Int. conf. "New Geometry of Nature", Kazan Univ. Press. v. 3, p.88-93.
46. Gusev A., Kawano N., Petrova N., 2006, "Fine Phenomena of the Lunar Librations in SELENE Mission", Proc. Int. Conf. "Near-Earth Astronomy", Kazan, p.343 – 350.
47. Kawano N., Gusev A., 2006, "Exploration of the Moon: Achievements, Problems, International Prospects", Proc. Int. Conf. "Near-Earth Astronomy", Kazan, p.324 – 342.
48. Hanada H., Heki K., Gusev A., Kawano N. , 2006, "ILOM project and detection of free lunar librations", Proc. of Int. Conf. "Near-Earth Astronomy", Kazan, p.351 – 358.
49. Araki H., Barkin Yu., Gusev A., 2006, "SELENE mission, RISE and ILOM projects and complex investigation of the Moon", Proc. of Int. Conf. "Near-Earth Astronomy", p.366-372.